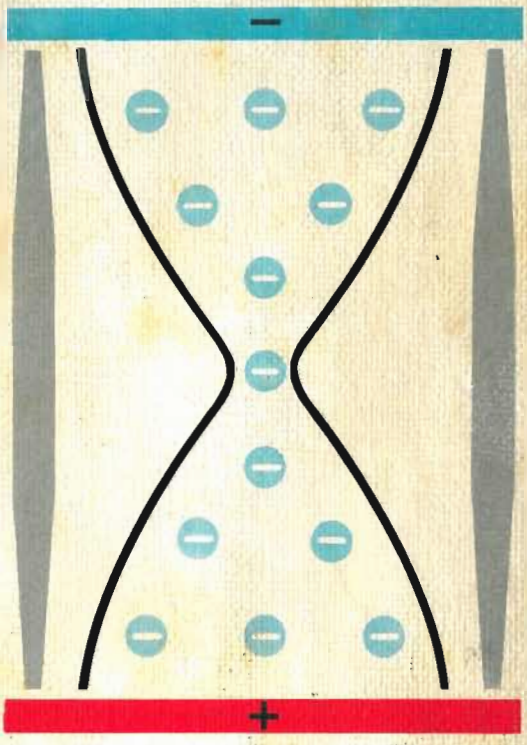
P. L. Oliva • F. Cardillo

MISURE ELETTRICHE

per Istituti Tecnici Industriali meccanici, chimici, nautici



Ghisetti & Corvi Editori

P. L. Oliva • F. Cardillo

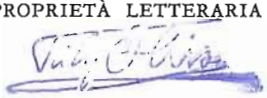
MISURE ELETTRICHE

ed esercitazioni di laboratorio

Per Istituti Tecnici Industriali
meccanici, chimici, nautici

GHISETTI & CORVI EDITORI
20133 Milano, via Bronzino 1

© PROPRIETÀ LETTERARIA RISERVATA



1969 ISTITUTO GRAFICO LITOSTAMPA - GORLE BERGAMO

PRESENTAZIONE

Il programma ministeriale, considerate le notevoli difficoltà che il giovane perito elettrotecnico dovrà affrontare nella applicazione pratica delle nozioni teoriche acquisite nel corso degli studi, ha previsto che agli insegnamenti teorici si aggiungessero esercitazioni di laboratorio idonee ad avviare concretamente il giovane alla realtà della vita professionale.

Questa raccolta di esercitazioni tiene conto di tali esigenze, sia nel campo scolastico che in quello professionale, e presenta una numerosa e differenziata serie di esercizi di laboratorio attraverso i quali si copre una larga casistica pratica e, soprattutto, si insegna una metodologia di lavoro che sarà strumento essenziale per la corretta impostazione dei diversi problemi applicativi che potranno presentarsi nella realtà industriale.

Ogni esercizio porta indicato lo scopo da raggiungere, la strumentazione impiegata (questo per evitare dispersione di tempo e danno ad apparecchiature usate in modo erroneo) e le difficoltà eventualmente incontrate.

Si è voluto anche completare l'opera con consigli pratici nel campo della installazione della illuminotecnica, senza tuttavia avere la pretesa di fare un trattato di specialità.

Gli autori ringraziano tutti coloro che hanno collaborato alla riuscita del testo ed i docenti che vorranno dare un loro contributo di suggerimenti e consigli per il miglioramento ulteriore dell'opera, nonchè gli Editori che, come sempre, hanno voluto dare una veste editoriale di particolare decoro.

GLI AUTORI

CAPITOLO I

COMPLEMENTI DI IMPIANTI

■ Impieghi dei quadri di bassa tensione

Il quadro può essere del tipo per distribuzione di energia oppure del tipo per manovra di macchine; in qualche caso può avere ambedue gli impieghi.

Quando il quadro ha impiego di distribuzione e di manovra in genere è costruito come un armadio a portico avente nel retro un passaggio di servizio della larghezza di almeno 800 mm e della altezza di almeno 2000 mm.

Nel retro di questo quadro sono installate le sbarre di distribuzione e la morsetteria dei comandi in maniera da lasciare libero un opportuno spazio per permettere il passaggio del personale addetto alla manutenzione.

Se il quadro è per media tensione, cioè oltre 380 Volt e fino a circa 1000 Volt, esistono particolari norme protettive per il personale addetto alle relative manovre e pertanto si rimanda lo studioso alla consultazione delle apposite norme codificate dalla C.E.I.

Si deve fare attenzione che ogni quadro porti indicati i valori della tensione e della corrente e quanto altro possa risultare utile agli effetti interessanti le manovre del quadro stesso.

Gli apparati di manovra quali interruttori ecc. devono essere di tipo a retroquadro in maniera che nessun danno possa accadere al personale durante le manovre a seguito dell'eventuale sviluppo di scintille o archi con relative proiezioni di metallo fuso.

Attualmente si preferiscono quadri interamente di lamiera; essi sono collegati rigorosamente a terra in modo che qualsiasi accidentale cedimento dell'isolamento delle apparecchiature o della strumentazione provochi la messa a terra immediata dell'impianto stesso evitando danni al personale addetto alla relativa manovra.

■ Cabine di media e alta tensione

Questo argomento fa parte della specializzazione per elettricisti e data la delicatezza di queste installazioni e la relativa pericolosità si invita il lettore a ricorrere, in caso di necessità di costruzione di quadri o di cabine del genere, a costruttori specializzati, allo scopo di evitare pericolose conseguenze.

Si ricordi in proposito che la cabina elettrica, soprattutto quando ha la funzione di sottostazione di alimentazione di uno stabilimento, è il cuore dello stesso e quindi qualsiasi accorgimento allo scopo di assicurare la continuità di esercizio e la sicurezza dello stesso ripagherà sempre nel tempo la maggior spesa eventualmente sostenuta.

■ Sottostazioni di conversioni

Gli impianti di conversione della corrente alternata in corrente continua costituiscono elemento di particolare interesse per i periti chimici ai quali può essere dato l'incarico della sorveglianza e dell'esercizio di qualche sottostazione del genere: è quindi opportuno che essi prendano, sia pure brevemente, conoscenza delle loro caratteristiche e delle relative esigenze.

Impianti di conversione del genere servono anche per la trazione elettrica e per gli impianti di illuminazione di soccorso o di emergenza, perchè in questo caso le cabine di conversione servono ad alimentare le batterie di accumulatori capaci di fornire la energia elettrica di illuminazione a corrente continua in mancanza della energia elettrica a corrente alternata. Questi impianti, sia detto per inciso, sono obbligatori in locali pubblici quali: teatri, cinematografi, sale di ritrovo, ed ospedali. Per questi ultimi esiste anche l'obbligo di una sottostazione speciale dedicata esclusivamente ad alimentare la sala chirurgica.

Nel caso invece degli impianti elettrochimici le sottostazioni di conversione sono numerose e hanno caratteristiche che variano di volta in volta a seconda del preciso impiego elettrochimico.

In linea generale la conversione può industrialmente realizzarsi con i metodi che seguono (vedi Oliva-Cardillo: Elementi di elettrotecnica, pag. 289):

a) con gruppi motore dinamo;

b) con convertitrici o commutatrici;

c) con raddrizzatori a vapore di mercurio o ad ossidi metallici o a semiconduttori.

I gruppi rotanti motore-dinamo sono andati un poco in disuso a causa della loro costosa manutenzione e del successivo perfezionarsi degli apparati elencati al paragrafo *b*) e a quello *c*). Ma poichè esistono ancora delle aziende che hanno installati gruppi rotanti motore-dinamo daremo qualche cenno sulle loro principali esigenze di esercizio.

Il motore asincrono, destinato alla rotazione del gruppo, richiede la normale manutenzione (vista nel primo libro) richiesta per tale tipo di motore.

Alcuni gruppi di conversione hanno il motore trifase di trascinamento sincrono con funzioni proprie caratteristiche che sono state elencate al capitolo delle macchine (Oliva-Cardillo: Elementi di elettrotecnica, pag. 255).

La dinamo, come si è detto parlando di questa macchina, ha una parte debole rappresentata dal collettore per il quale è necessaria un'assidua e vigile attenzione (di cui si è già parlato) per evitare che con l'andar del tempo il collettore si guasti in modo irreparabile.

Si tenga a proposito presente che il costo del collettore nuovo può alle volte rappresentare un valore pari al 20-30% del prezzo complessivo dell'intera macchina.

■ Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

In genere la costruzione di linee elettriche è affidata a specialisti in questo ramo. Tuttavia si ritiene opportuno dare alcuni elementi di indirizzo base per la guida di massima sulla scelta di un tipo di trasmissione di energia elettrica oppure di un altro. In sostanza queste installazioni devono, a pari potenza trasmessa, costare il meno possibile, pur garantendo il minor costo di manutenzione e le minori perdite di esercizio.

Noi abbiamo tre sistemi per trasmettere energia elettrica:

1) il sistema a corrente continua;
2) il sistema a corrente alternata monofase;
3) il sistema a corrente alternata trifase.

Per il calcolo del rendimento elettrico nella trasmissione della energia elettrica si può applicare la formula

$$\eta = \frac{P}{P + p} 100 \qquad (1)$$

dove P rappresenta la potenza da trasmettere e p la perdita ammessa per tale trasmissione.

Si tenga in proposito presente che potendo scegliere fra una linea in corrente continua e una in corrente alternata monofase il sistema della corrente continua è sempre più conveniente, naturalmente a parità di tensione; qualora il fattore di potenza della rete sia inferiore a 0,86 risulta più conveniente il sistema trifase.

Queste considerazioni, che sono naturalmente ricavate da conti analitici, hanno spinto molti costruttori a progettare linee in corrente continua anzichè in corrente alternata, ma, per un complesso di problemi tecnici, allo stato attuale non si vede ancora la soluzione pratica del problema a

favore della corrente continua, mentre nell'ambito degli impieghi della industria questa possibilità di impiego deve essere esaminata caso per caso, naturalmente quando si debba disporre di rilevanti quantità di corrente continua per determinati usi.

La tabella, che segue, riporta le principali sezioni dei conduttori di rame, il loro peso e le più interessanti caratteristiche fisiche.

■ Linee di trasmissioni aeree

Si ritiene fare cosa utile per la specialità dei meccanici dare alcune note di massima sul dimensionamento dei conduttori dal punto di vista meccanico.

In una linea si chiama campata la distanza fra i due pali o sostegni successivi.

La lunghezza di queste campate può dipendere, oltre che dalla caratteristica dei sostegni stessi, anche dalla natura del terreno e dalla zona di attraversamento. Ad esempio con pali di legno non si superano i 50 metri di campata, mentre con quelli di ferro e di cemento si può arrivare agevolmente anche a 200 metri e più.

Per il calcolo meccanico della linea, possono essere considerati due casi:

a) tralicci sullo stesso livello;
b) tralicci su livelli diversi.

Dati tecnici sui fili di rame per linee elettriche

Diametro in mm	Sezione in mmq	Peso in kg/km	Resistenza in Ohm/km
0,20	0,0314	0,2796	533,26
0,40	0,1257	1,1184	133,32
0,60	0,2827	2,5164	59,25
0,90	0,6362	5,6614	26,33
1,00	0,7854	6,990	21,331
1,50	1,7671	15,728	9,480
2,00	3,1416	27,950	5,333
2,50	4,9087	43,688	3,413
3,0	7,0686	62,910	2,3701
4,0	12,566	111,84	1,3332
5,0	19,635	174,75	0,8532
6,0	28,274	254,64	0,5925
7,0	38,485	342,51	0,4353
8,0	50,265	447,36	0,3333
9,0	63,617	566,19	0,2633
10,0	78,540	699,00	0,21331

Caratteristiche delle corde di rame crudo di sezioni normali raccomandate per linee aeree, secondo le norme C.E.I.

Sezione nominale mm²	Formaz. N. fili e diametro mm	Somma delle sez. rette dei fili comp. mm²	Diametro della corda mm	Peso per km kg	Minimo carico di rottura tot. kg	Resistenza elettrica a 20° C ohm/km
10	7 × 1,35	10,02	4,05	90,0	323	1,8100
16	7 × 1,70	15,89	5,10	144,1	513	1,1410
20	7 × 1,90	19,85	5,70	180,0	641	0,9130
25	7 × 2,10	24,24	6,30	219,8	783	0,7480
35	7 × 2,50	34,34	7,50	311,6	1110	0,5280
50	7 × 3,00	49,48	9,00	448,7	1600	0,3660

Caratteristiche dei conduttori cilindrici di rame crudo di sezione raccomandata per linee aeree, secondo le norme C.E.I.

Sez. nom. mm²	Diametro mm	Sezione teorica mm²	Peso per km in kg			Carico min. di rottura per la sez. teorica kg	Resistenza elettrica a 20° C in ohm per km	
			Teor.	Min.	Mass.		Teor.	Mass.
6	2,75 ± 0,03	5,94	52,81	51,66	53,96	224	3,013	3,059
10	3,55 ± 0,03	9,90	88,01	86,02	89,99	376	1,796	1,837
16	4,50 ± 0,04	15,90	141,35	138,26	144,55	604	1,118	1,143
20	5,00 ± 0,05	19,63	174,24	171,08	178,06	744	0,907	0,924
30	6,00 ± 0,05	28,27	251,36	246,36	256,14	1074	0,629	0,636
35	6,50 ± 0,06	33,18	295,15	268,68	301,38	1260	0,536	0,547
40	7,00 ± 0,07	38,48	342,13	335,32	349,00	1462	0,462	0,471
50	8,00 ± 0,08	50,27	446,28	437,97	455,84	1905	0,354	0,361

a) campata a livello (vedi fig. 1)

Indicando con:

p carico unitario del conduttore (su metro di lunghezza e per mm² di sezione);
S sezione del conduttore in mm²;
l lunghezza della campata in m;
f freccia espressa in m;
σ sollecitazione unitaria in Kg/mm²;
d diametro del conduttore;

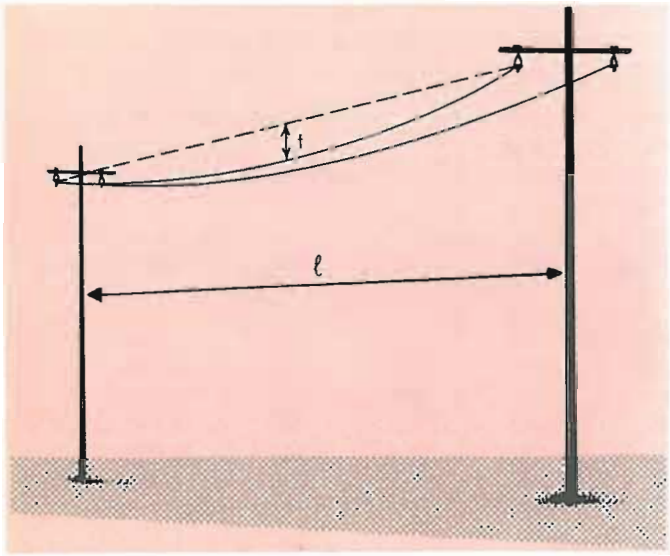


Fig. 1 - Campata.

il valore della freccia risulta essere:

$$f = \frac{pl^2}{8\sigma}.$$

La lunghezza effettiva del conduttore risulta essere:

$$L = d + \frac{8f^2}{3d}.$$

b) campata non a livello

Per facilitare il calcolo si suppone che la campata sia a livello, e a tale scopo si considera una lunghezza ipoteticamente più lunga della campata cioè pari a quella occorrente per portare il traliccio più basso alla quota dell'altro.

La nuova lunghezza maggiorata risulta essere l', con:

$$l' = l + \frac{2\sigma h}{pl}; \qquad f = \frac{pl'^2}{8\sigma},$$

dove h è la differenza di quota dei due tralicci.

La lunghezza effettiva del conduttore risulta essere:

$$L = l + \frac{p^2 l^3}{24\sigma^2}$$

valore che varia a seconda della temperatura ambientale.

Le norme C.E.I. per l'esecuzione delle linee elettriche esterne prescrivono che i conduttori stessi nelle condizioni più sfavorevoli non debbano essere sollecitati ad un carico superiore alla metà del corrispondente carico di rottura e a non più di 9/10 del carico al limite di elasticità.

Si esamini la tabella a pag. 13 riguardante "le caratteristiche dei materiali per condutture elettriche". Si tenga infine presente che per fare un calcolo completo delle sollecitazioni meccaniche di un conduttore di rame si deve tenere conto dell'effetto del vento, la cui velocità può essere anche di 130 km/ora e delle sollecitazioni determinate da eventuali manicotti di ghiaccio il cui diametro può essere anche di 20 o 25 mm.

Vi sono delle apposite tabelle che danno già i valori di carico per mm^2 in funzione della distanza dei supporti in maniera da facilitare il calcolo applicativo dei conduttori.

■ Notizie generali sui sostegni delle linee elettriche di trasmissione di energia

I pali possono essere soggetti a sforzi trasversali dovuti al vento, a sforzi verticali dovuti al peso dei conduttori e al peso del proprio sostegno, a sforzi longitudinali determinati dalla eventuale rottura di una campata. Esistono in proposito dettagliate norme che prendono in esame le varie possibilità ed eventualità di sollecitazione dei conduttori, degli isolatori e dei sostegni in maniera che, caso per caso, si trova la soluzione più adatta.

I sostegni possono essere di varia natura; esiste ancora in alcune zone la convenienza delle palificazioni di legno; in questo caso i valori medi dei pali impiegati sono i seguenti: sino all'altezza di 7 metri si può avere uno sviluppo periferico alla base di cm 50 ed in cima di cm 30, per l'altezza di 8 metri alla base di cm 55 e in cima di circa cm 33, per altezze fino a 9 metri alla base di cm 60 ed in cima di cm 35 circa.

Naturalmente la messa in opera di questi pali richiede la preparazione del terreno con basi di cemento e trattamenti del palo stesso con cloruro di zinco, cloruro di sodio o creosoti allo scopo di proteggere il palo dalle aggressioni ambientali (vedi Oliva-Cardillo: Elementi di elettrotecnica, pag. 13, *Legno*).

Caratteristiche dei materiali per condutture elettriche

Materiale	Proprietà meccaniche			Proprietà elettriche		
	Peso spec. in Kg/cmc	Carico di rottura in Kg/mmq	Allungamento alla rottura in % per fili del diametro in mm	Coefficiente di dilatazione lineare per 1° C	Resistività microhm . cmc a 20° C	Coefficiente di temperatura a 20° C
Rame internazionale	$8{,}89 \times 10^{-3}$	—	—	—	1.7241	0,00393
Rame del commercio:						
ricotto	$8{,}89 \times 10^{-3}$	26	30	17×10^{-6}	1,76	0,00385
semicrudo	$8{,}89 \times 10^{-3}$	40 ÷ 32	1,5 ÷ 2,4	17×10^{-6}	1,78 ÷ 1,76	0,00382
crudo	$8{,}89 \times 10^{-3}$	44 ÷ 40	1,2 ÷ 2	17×10^{-6}	1,79 ÷ 1,77	0,00379

I pali di legno naturalmente devono essere calcolati secondo le sollecitazioni cui possono essere sottoposti; se invece vengono usati pali di cemento o di ferro in genere sono le stesse Case costruttrici a dare apposite tabelle sulle quali in funzione dell'altezza e del dimensionamento del palo stesso vengono indicate le massime sollecitazioni cui il palo può andare soggetto.

Di solito i pali di cemento, essendo piuttosto pesanti, sono preferiti in pianura o in luogo dove risulti facile il loro trasporto. I pali in ferro invece, pur richiedendo una maggiore manutenzione in quanto periodicamente devono essere verniciati, trovano, perchè più leggeri, il loro impiego preferenziale nelle zone di difficile accesso.

Si ricordi che tutti i pali devono essere sempre collegati a terra mediante propri dispersori e questo per l'incolumità delle persone.

■ Distribuzione di energia elettrica mediante cavi

La messa in opera dei cavi richiede sempre personale ed attrezzature particolari quando si tratta di tensioni elevate, superiori a 380 volt. I cavi possono essere protetti da una guaina di piombo oppure da una guaina di poliesteri secondo il tipo del cavo e la località ove questo deve essere piazzato. Si deve fare particolare attenzione alla scelta dei cavi per evitare che questi vadano soggetti a surriscaldamenti dovuti a errato dimensionamento.

Portiamo, a titolo di esempio, una tabella che indica a quali valori di corrente possono essere sottoposti cavi fino a 2 KVolt.

Portata in Ampere dei cavi unipolari con conduttori di rame per c.a. secondo le norme C.E.I.

Sezione nominale mm²	Portata in Ampere (fino a 2 KV)	
	interrati	in aria
5	65	60
8	80	70
10	95	85
16	115	105
20	130	120
50	215	205
100	315	315
150	385	405
240	490	535
400	610	695
600	700	825

■ Luminosità e illuminazione

Come certamente l'allievo ha già visto nel corso di fisica ottica, la luce porta con sè della energia. Ogni corpo sufficientemente riscaldato emette luce passando da un iniziale colore rosso appena accennato ad un colore bianco abbagliante via via che la temperatura aumenta.

Pertanto sarà possibile misurare la temperatura di un corpo sia quando questo, opportunamente riscaldato, emette dei raggi luminosi, sia quando questi, opportunamente annerito, ed esposto all'azione della luce si riscalda progressivamente. Quindi, nota la superficie del corpo in esame ed il tempo durante il quale avviene il fenomeno, sarà possibile misurare la quantità di calore sviluppata o ricevuta.

Per fissare le idee immaginiamo, per semplicità, di prendere in esame una sorgente luminosa e di misurarne gli effetti ad una opportuna distanza allo scopo di poter considerare la sorgente luminosa come praticamente uniforme. Chiameremo *flusso di energia raggiante* o flusso luminoso attraverso la determinata area di estensione A la quantità di energia che attraversa questa superficie nella unità di tempo. Il flusso luminoso è misurato in Joule al secondo quindi in Watt.

Il flusso luminoso se colpisce l'unità di area prende il nome di *intensità di illuminazione*.

Di conseguenza potremo definire come intensità di illuminazione di una superficie esposta ad una radiazione luminosa quella quantità di energia che cade su di essa ogni secondo e per metro quadrato di superficie.

Si chiama anche *intensità luminosa* della sorgente la quantità di energia da essa irradiata per unità di tempo entro un angolo solido unitario.

In genere si considera uniforme in tutte le direzioni la intensità luminosa della sorgente in esame. Potremo anche chiamare *flusso luminoso* quello irradiato da una sorgente luminosa entro un certo angolo solido omega per cui ci sarà lecito scrivere $F = I\Omega$, ove F è il valore del flusso, I l'intensità luminosa, omega l'angolo solido preso in esame.

Da quanto precede, si vede che l'*intensità di illuminazione dipende dal quadrato della distanza dalla sorgente*. Pertanto potremo dire che la intensità di illuminazione su un'area normale alla propagazione della luce è uguale al rapporto fra intensità luminosa della sorgente, supposta puntiforme, ed il quadrato della distanza dell'area presa in esame dalla sorgente stessa.

Potremo quindi concludere anche che l'intensità di illuminazione su due aree prese in esame sarà inversamente proporzionale al quadrato delle distanze della sorgente stessa.

■ Fotometria

Due sorgenti luminose aventi eguale intensità dal punto di vista energetico possono dare, ad un occhio che le esamini, sensazioni fisiologiche diverse secondo il loro colore.

Alle volte risulta conveniente misurare o confrontare varie sorgenti luminose non solo dal punto di vista energetico ma anche dal punto di vista fisiologico.

Ridefiniamo quindi le unità di misura delle stesse grandezze del paragrafo precedente, non più però attraverso una misura della energia ad esse associata ma attraverso un confronto diretto delle grandezze da misurare con un campione arbitrario, in modo da tener conto direttamente dell'intensità della sensazione fisiologica dell'occhio umano. Le unità di misura così definite prendono il nome di fotometriche.

Fu convenuto di riconoscere come *unità internazionale di intensità luminosa la Candela Internazionale*, la cui intensità luminosa è la *ventesima parte dell'unità fondamentale chiamata Violle* corrispondente all'intensità luminosa prodotta da una sorgente costituita da un cm quadrato di superficie di platino alla temperatura di fusione.

Con l'avvento della lampada elettrica questa unità di intensità luminosa è stata spesso sostituita da altri campioni che si riferiscono a valori di potenza data o assorbita dalle lampade a incandescenza.

Tuttavia si è fatto in modo che le unità fotometriche derivino dalla candela internazionale per rendere i calcoli unificati o unificabili.

Si chiama lumen l'unità di flusso luminoso di una sorgente puntiforme avente l'intensità luminosa di una candela cioè il flusso luminoso di una candela per l'angolo solido di uno steradiante. Il lux rappresenta invece l'unità di intensità di illuminazione prodotta da una sorgente di entità pari a una candela su di una superficie normale alla direzione dei raggi posti alla distanza di un metro. In sostanza potremo anche dire che un lux è l'illuminazione di una superficie su cui cade il flusso di un lumen per metro quadrato.

Appositi apparecchi sono costruiti allo scopo di misurare l'intensità luminosa di una sorgente paragonandola ad un'altra presa come campione; questi apparati prendono il nome di *fotometri*.

Varie case costruttrici hanno studiato dispositivi pratici soprattutto dal punto di vista della ricerca e degli impieghi industriali, purchè siano facilmente paragonabili i reali valori prescindendo dalle variazioni di colore che come si è visto influenzano grandemente il paragone fra sorgenti diverse.

■ Coefficiente di visibilità

È *il rapporto tra il flusso luminoso emesso da un elemento radiante ed il flusso di energia elettromagnetica corrispondente.* Di conseguenza questo coefficiente stabilisce un rapporto tra le energie fotometriche e quelle energetiche.

Il coefficiente di visibilità dunque è una grandezza fisica che moltiplicata per una grandezza energetica ci dà un valore fotometrico.

Quindi potremo scrivere che il flusso espresso in lumen è eguale al coefficiente di visibilità C per la potenza energetica in watt cioè

$$F_{\text{lumen}} = C \times P_{\text{watt}}.$$

Un altro elemento interessante nel campo applicativo industriale è la definizione di *efficienza* di un elemento radiante cioè il *rapporto tra il flusso luminoso sferico integrale* (che tiene cioè conto di tutte le lunghezze di onda emesse) e *la potenza assorbita da questo elemento* per generare le varie lunghezze d'onda.

Quindi questo coefficiente sarà espresso in *lumen/watt*. Un altro elemento importante è il *coefficiente di consumo* di un elemento radiante, in altri termini il rapporto tra la *potenza assorbita per unità di flusso luminoso sferico integrale emesso*, in watt/lumen.

■ Brillanza o splendore simbolo B

Si definisce brillanza in un punto di una superficie raggiante in una data direzione il valore del quoziente tra la intensità luminosa misurata nella direzione in esame e dovuta a un elemento della superficie intorno a questo punto e l'area apparente cioè la proiezione dell'area di tale elemento su di un piano normale alla direzione.

L'unità di brillanza è lo stilb SB; la brillanza di un elemento radiante equivale a un SB quando si ha una candela per cm² di area apparente.

La brillanza delle lampade ad arco è compresa fra 15.000 e 50.000 SB (candela per cm²).

■ Lampade ad arco

Le lampade ad arco più efficienti funzionano a corrente continua con una tensione di circa 40-45 Volt.

Le lampade possono funzionare con carboni sovrapposti oppure con carboni tra loro convergenti.

Vi sono lampade che funzionano in aria libera, altre che funzionano sotto la protezione di cristalli di quarzo che impediscono reazioni della fiamma luminosa con gli agenti atmosferici.

Gli elettrodi sono di carbone miscelato con sali minerali quali calcio, stronzio e magnesio destinati a dare un particolare colore alla fiamma stessa.

Vi sono anche lampade ad arco alimentate con elettrodi metallici (ad es. il catodo è di magnetite e l'anodo di rame). La magnetite fa da supporto a piccole percentuali di altre sostanze quali l'ossido di titanio che dà all'arco una particolare luminosità.

Il coefficiente di efficienza di queste lampade è dell'ordine della trentina di lumen per watt mentre il coefficiente di consumo è inferiore allo 0,05 watt per lumen.

■ Lampade ad incandescenza

Le lampade ad incandescenza sono a filamento metallico; quelle a filamento di carbone appartengono ormai alla storia.

Queste lampade funzionano in una atmosfera di un determinato gas inerte (argon o azoto) che impedisce la facile evaporazione del metallo sottoposto ad un calore piuttosto intenso e nello stesso tempo riduce il fenomeno di ossidazione fra il metallo incandescente e l'atmosfera che lo circonda. I filamenti sono generalmente di tungsteno, chiamato anche volframio, il cui peso atomico è 184 e il peso specifico 19,6; il coefficiente di temperatura è 0,0051, e la resistenza specifica a 25° di circa 0,6 ohm/mm² per metro.

I flussi luminosi emessi dalle lampade ad incandescenza non sono proporzionali alla potenza assorbita ma crescono in funzione della stessa.

La temperatura media raggiunta dal filamento nelle lampade è di 2600° circa se si tratta di lampade in atmosfera di gas (2300° se si tratta di lampade nel vuoto). Il coefficiente di consumo di queste lampade varia da 0,1 a 0,05 watt per lumen a seconda della potenzialità delle lampade stesse.

Il coefficiente di efficienza o di rendimento luminoso di queste lampade quindi va da 10 a 20 lumen su watt. La loro durata media è intorno alle 1000 ore semprecchè il valore della tensione di alimentazione rimanga costante. La brillanza di queste lampade è mediamente di 1000 SB. Di conseguenza è facile poter fare un bilancio energetico del funzionamento di queste lampade: l'energia che si trasforma in luce non supera il 10%. Un'altra porzione di energia che si trasforma in calore è nella virola di collegamento fra la linea e il bulbo (circa il 25%) ed infine la rimanente quota che è intorno al 65% è rappresentata da energia che si trasforma in calore radiante. Si vede quindi che la quantità di energia che effettivamente viene trasformata in luce è di valore piuttosto modesto.

■ Lampade a vapore di mercurio e a vapore di sodio

Le lampade a vapore di mercurio danno una luce piuttosto verde-azzurra, quindi quasi monocromatica; possono funzionare a corrente continua o a corrente alternata. Il loro coefficiente di efficienza raggiunge i 15 lumen su watt. Vi sono tipi di lampade ad alta tensione il cui coefficiente è ancora più elevato.

Le lampade a vapore di mercurio in questi anni trovano particolare impiego negli incroci stradali avendo un elevato coefficiente di efficienza (che va fino a 40 lumen su watt); danno una luce monocromatica molto efficace per la visibilità. Purtroppo questa luce non è di piacevole aspetto.

Le lampade a vapore di sodio hanno alto rendimento luminoso e la loro luce gialla permette la percezione degli ostacoli: serve per autostrade e per cortili di stabilimenti.

■ Lampade a gas rarefatti

Sono tubi al neon che contengono sali speciali producenti una luce caratteristica e hanno un coefficiente di efficienza dell'ordine di 15 lumen su watt. Funzionano con tensione relativamente alta e quindi non sono pratiche negli impieghi domestici ma servono solo per la illuminazione a carattere propagandistico.

■ Lampade fluorescenti

Sono delle lampade contenenti delle sostanze capaci di emettere radiazioni di frequenza non luminosa come raggi ultravioletti di frequenza superiore a 800 trilioni di Hz.

In queste lampade i raggi invisibili ultravioletti vengono trasformati in raggi visibili a frequenza minore immettendo nel tubo sostanze speciali.

Le lampade fluorescenti si dividono in due categorie a *catodo caldo* e a *catodo freddo*.

■ Lampade fluorescenti a catodo caldo

Le lampade fluorescenti a catodo caldo risultano di un tubo contenente argon con mercurio, da 4 spine per l'attacco a speciali portalampade, due da una parte e due dalla parte opposta. Ad ogni coppia di spine fa capo un filamento di tungsteno cosparso di ossido di bario, capace di emettere elettroni se riscaldato. Per avviare questi tubi occorre servirsi di uno speciale circuito composto da un interruttore automatico detto starter *S* a luminescenza e da un reattore *R* (vedi fig. 2).

Lo starter a luminescenza *S* è un interruttore automatico costituito da una piccola lampada al neon (fig. 3), che inizialmente ha i contatti aperti. Chiudendo l'interruttore della lampada fra una lamina bimetallica e il contatto fisso nasce una scarica luminescente, per cui la lamina bimetallica si scalda, si dilata e chiude il contatto. Una corrente passa ora nei due

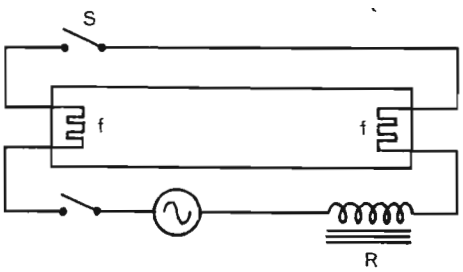


Fig. 2 - Schema accensione lampada fluorescente a catodo caldo.

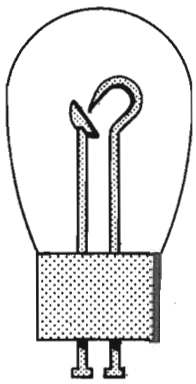


Fig. 3 - Starter.

filamenti principali *f* che riscaldandosi emettono elettroni mentre le sostanze contenute nel tubo emettono raggi ultravioletti. Poichè ora la corrente passa nel tubo lo starter che ne è in parallelo si raffredda, la lamina stacca il contatto dello starter mentre fra i due filamenti *f* incandescenti si crea un arco stabile e la lampada risulta definitivamente innescata. Trattandosi di corrente alternata l'arco scocca in un semiperiodo in un senso, nell'altro semiperiodo in direzione opposta. Sostanze fluorescenti, contenute nel tubo, trasformano i raggi ultravioletti in raggi luminosi di diverso colore.

Ad esempio si ottiene la luce bianca-azzurra mettendo nel tubo tungstato di magnesio, la luce rosa con silicato di cadmio.

È proibito nelle nuove lampade l'uso di sali di berillio perchè in caso di rottura i relativi pezzi di vetro trattati con questi sali sono pericolosi. Occorre rifasare l'impianto con condensatori, poichè il reattore applicato alla lampada provoca uno sfasamento il cui fattore di potenza è circa 0,6.

La durata delle lampade dipende principalmente dal numero delle accensioni: si possono ottenere da 4000 a 6000 ore di funzionamento.

Vengono usate negli stabilimenti, laboratori, scuole, ecc., dove restano accese per almeno 4 ore consecutive. Hanno consumo limitato rispetto a quelle ad incandescenza; la loro brillanza è piccola: $0{,}2 \div 0{,}6$ stilb. Per questo si ha una luce piuttosto diffusa.

■ Lampade a catodo freddo

Le lampade a catodo freddo sono alimentate da un trasformatore elevatore di tensione; i tubi sono lunghi e l'innesco è dovuto alla elevata differenza di potenziale fra i due elettrodi, per cui non occorre preriscaldare il catodo.

Vengono usate per le insegne luminose a scopo pubblicitario e non possono essere installate in case di abitazione a causa della elevata tensione di funzionamento. La presenza del trasformatore elevatore abbassa il fattore di potenza dell'impianto a circa 0,6, per cui si inserisce in parallelo al trasformatore un condensatore rifasatore.

Con queste lampade si può ottenere una vasta gamma di colori a seconda delle sostanze immesse nel tubo; il funzionamento è identico a quello delle lampade a catodo caldo.

■ Proprietà dell'occhio umano interessanti la applicazione tecnica della illuminazione

L'occhio umano prova in presenza di una sorgente luminosa diverse sensazioni che dipendono non solo dal flusso luminoso che lo investe ma anche dal contrasto, cioè dalla differenza di intensità luminosa fra le varie sorgenti che contemporaneamente colpiscono l'occhio stesso. Pertanto

il tecnico della illuminazione deve preoccuparsi di creare delle sorgenti luminose che non diano disagio all'occhio dell'osservatore.

Scopo quindi principale dei portalampade o dei diffusori è quello di distribuire la brillanza necessariamente elevata della sorgente luminosa e pressochè puntiforme su una superficie emittente più ampia in modo da ridurre questo contrasto di luminosità.

■ Valori pratici usati nell'illuminamento

Se si consultano varie tabelle compilate in tempi successivi, si nota come esista una lievitazione di questi valori: la società moderna si è abituata a vivere in ambienti illuminati più intensamente di quanto non avvenisse anni addietro.

Di conseguenza, la tabella che segue si adatta solo alle esigenze attuali di un illuminamento medio superiore.

Corridoi: 30 lux.
Bagni: 30 lux.
Studi: 100 lux.
Camere da letto: 50 lux.
Camere da pranzo: 150 lux.
Sale di ricevimento: da 50 a 100 lux.
Atri di alberghi o luoghi di ritrovo: 100 lux.
Aule da disegno: da 100 a 150 lux.
Uffici amministrativi: da 50 a 100 lux.
Laboratori: da 50 a 100 lux.
Punti di vendita: intorno ai 100 lux.
Locali industriali di lavoro: da 50 a 70 lux.
Luoghi di lavorazione di oggetti minuti intorno ai 100 lux.
Sale operatorie: da 150 a 200 lux.
Strade secondarie da 10 a 15 lux.
Strade importanti: 50 lux.

■ Saldatura elettrica

La saldatura elettrica ha preso uno sviluppo sempre più intenso ed esteso nella industria meccanica ed elettromeccanica.

Si possono distinguere saldatrici ad arco ad azione diretta e ad azione indiretta.

Nelle prime l'arco è stabilito dall'operatore stesso, nelle altre l'arco è stabilito da un circuito elettronico a tempo che fa scattare la scintilla destinata alla saldatura a intervalli determinati da una prefissata programmazione in base all'impiego ed allo scopo da raggiungere.

Per la saldatura generalmente si usano elettrodi del tipo rivestito con sali allo scopo di ridurre l'azione disturbatrice della atmosfera che reagisce durante la saldatura stessa per effetto dell'alta temperatura che assume il metallo.

Sia nel caso della saldatura diretta che di quella indiretta in genere si preferisce l'impiego della corrente continua, che è indispensabile quando si vogliono costruire dei serbatoi a tenuta, impiegando metalli di piccoli spessori.

Nelle saldature indirette si può usare la saldatura sia con il sistema a resistenza che con quello a scintillio; nel primo caso per effetto della saldatura si ha un vero e proprio rigonfiamento nella zona di unione che deve essere eliminato mediante una lavorazione meccanica; nel secondo caso invece i pezzi vengono portati a contatto e poi leggermente distanziati in modo da provocare degli archi elettrici fra le due superfici affacciate determinando la fusione del metallo.

Solo quando la fusione ha avuto inizio, i due metalli vengono di nuovo avvicinati per assicurare una buona saldatura.

Nella saldatura indiretta si utilizza in genere un circuito così concepito: la corrente alternata monofase o trifase alimenta un gruppo di conversione statico capace di creare corrente continua; questa carica un complesso di batterie di condensatori capaci di accumulare l'energia prodotta nel tempo. Le batterie sono collegate mediante un accoppiamento induttivo al circuito secondario nel quale è inserito il pezzo da saldare. Quando le batterie di condensatori sono cariche si provoca mediante pulsante la rapida scarica delle batterie stesse sul primario dell'accoppiamento induttivo; nel secondario di questo trasformatore di accoppiamento circola allora una corrente estremamente intensa e breve nel tempo, capace di provocare in un primo istante lo scintillio fra i due pezzi da saldare ed infine la fusione dei due pezzi fra di loro.

Regolando opportunamente la capacità della batteria di condensatori, si evita che la corrente duri un tempo superiore a quello strettamente necessario per assicurare la saldatura e si evita il pericolo che questa risulti bruciata od insufficiente.

■ Saldatura a resistenza per punti in c.a.

La saldatura a resistenza per punti in c.a. serve ad unire per punti due lamiere sovrapposte. Gli elettrodi sono collegati al secondario di un trasformatore funzionante alla tensione di 5 V; la corrente mediante gli elettrodi attraversa le due lamiere da saldare e crea la fusione dei punti di contatto.

■ Saldatura continua a rulli in c.a.

La saldatura continua a rulli in c.a. realizza la unione di due lamiere senza soluzione di continuità: infatti i due rulli mentre scorrono tengono serrate fra di loro le due lamiere, effettuando la saldatura; la tensione secondaria del trasformatore di alimentazione è di 2,5-5 V.

■ Caldaie elettriche

Un altro apparato che può essere utile nei laboratori oltre che nelle officine è la caldaia elettrica. Le caldaie elettriche hanno giustificato motivo di impiego quando si desidera produrre del vapore in piccola quantità senza l'ausilio di combustibili tradizionali. Hanno il vantaggio di richiedere un ingombro di installazione molto modesto, di essere pronte ad entrare in servizio quando occorrono senza speciali predisposizioni o forti spese di manutenzione, di poter essere installate, data la loro semplicità e sicurezza, nelle immediate vicinanze del luogo di utilizzo del vapore; il costo di esercizio, però, risulta piuttosto elevato a causa del prezzo della energia elettrica.

Funzionando in assenza di fumo, con perfetta pulizia ed elevato rendimento energetico, risultano di pratico impiego nei laboratori di ricerca, al servizio di industrie che producono loro stesse energia elettrica a basso prezzo oppure consumano già forti quantità di energia elettrica per cui il costo di esercizio di queste caldaie costituisce fattore del tutto trascurabile rispetto ai vantaggi notevoli che ne derivano.

La caldaia è formata dal serbatoio contenente l'acqua fredda, dal coperchio detto anche duomo nel quale si accumula il vapore e dagli elettrodi costruiti in acciaio inossidabile. La caldaia poi è corredata di una doppia valvola per il controllo del vapore, di un indicatore di livello dell'acqua nel serbatoio, del manometro e spesso anche di un servomeccanismo che regola la posizione degli elettrodi nell'acqua in modo da dosare la resistività in funzione della richiesta di vapore, oppure in funzione della pressione registrata nel duomo. Con questo sistema, quando non c'è richiesta di vapore, gli elettrodi automaticamente si alzano ed escono dal bagno, evitando così la produzione di vapore non necessaria. Quando invece c'è richiesta di vapore la pressione del duomo diminuisce, gli elettrodi si abbassano progressivamente nel bagno e stabiliscono il contatto elettrico con l'acqua che evaporizza tanto più intensamente quanto più immersi sono gli elettrodi nel liquido stesso. Con questo accorgimento la caldaia ha un funzionamento praticamente automatico e il consumo è strettamente legato alla richiesta di vapore.

Le caldaie possono essere alimentate con tensioni differenti in funzione della potenzialità: in genere per le caldaie installate nei laboratori la tensione di esercizio è di 380 Volt, mentre per maggiori richieste la potenzialità della caldaia aumenta, e di conseguenza aumenta anche il valore della tensione applicata, che può raggiungere anche quello di 5000-6000 Volt. Il movimento degli elettrodi può essere manuale oppure ad azione idraulica, oleodinamica o elettromeccanica.

Il mantenimento del livello dell'acqua nella vasca può essere operato con i tradizionali sistemi a galleggiante che azionano direttamente la pompa di alimentazione della caldaia, pompa che non sempre è necessaria

quando si produca del vapore ad una pressione minore della pressione normale dell'acquedotto.

Non occorre prevedere l'intervento di una pompa ausiliaria in quanto, qualora la caldaia rimanesse senza acqua, si interrompe spontaneamente il circuito elettrico tra elettrodi e liquido per mancanza di quest'ultimo e quindi la produzione di vapore si interrompe automaticamente senza alcun pericolo per l'esercizio.

■ Impianti di forza motrice

Quando si deve fare un impianto ex novo in uno stabilimento, logicamente si deve ricorrere a tecnici specializzati, elettricisti, perchè facciano le installazioni principali della rete di alimentazione.

Però per installare nuove macchine di modesta entità e responsabilità non è necessario procedere ad un vero e proprio calcolo di dimensionamento della linea in funzione delle perdite percentuali della potenza o della caduta di tensione.

Di conseguenza in questi casi ci si attiene alla scelta di cavi elettrici in modo da non superare la densità di corrente da 1,5/2,5 amp. per mm².

Qui di seguito si dà una tabella indicativa della potenza dei motori che si possono utilizzare e della corrente da loro richiesta.

Si tenga però presente che motori costruiti secondo le norme C.E.I. devono portare una targhetta nella quale risulti indicata la corrente massima da essi assorbita.

Tabella per impianti di forza motrice

KW	V	Rendimento %	Fattore di potenza	Ampere di linea	Sezione del conduttore in mm²
0,5	380/3	70	0,8	1,35	1
1	380/3	75	0,8	2,6	1,5
2,5	380/3	80	0,82	5,8	3
4	380/3	85	0,84	8,5	4
10	380/3	87	0,85	20	10
0,2	220/1	60	0,6	2,5	1,5
0,5	220/1	65	0,7	5	2,5
1	220/1	70	0,75	8,5	3,5
0,2	125 cc	60	—	2,5	1,5
0,5	125 cc	60	—	6,7	3
1	125 cc	65	—	12	5
5	125 cc	70	—	57	25
10	125 cc	75	—	110	55

■ Norme generali per le installazioni delle macchine elettriche

Le macchine elettriche devono essere montate in luoghi asciutti, ventilati, separati dagli ambienti polverosi o dove sono collocate sostanze infiammabili.

Le macchine devono essere accessibili facilmente in ogni loro parte e munite di opportuni interruttori multipolari proporzionati alla potenzialità della macchina.

Nel caso si tratti di un trasformatore di alimentazione si devono prevedere opportuni interruttori sia a monte che a valle ed è anche necessario montare sulla linea di bassa tensione delle valvole di tensione collegate a terra per impedire accidentali contatti fra gli avvolgimenti ad alta tensione e quelli a bassa tensione. Le carcasse delle macchine devono essere sempre collegate a terra. Norme particolari danno precise e dettagliate prescrizioni in merito.

Le fondazioni necessarie alla posa delle macchine devono essere in calcestruzzo e di dimensioni tali da distribuire opportunamente il carico in base alle caratteristiche del terreno.

Il blocco di calcestruzzo, oppure la macchina, possono essere isolati con elementi elastici (di gomma) per non trasmettere al terreno eventuali fastidiose vibrazioni spesso dannose agli strumenti che si trovano nelle vicinanze e alle persone.

■ Norme particolari riguardanti le dinamo

Dal capitolo riguardante le macchine abbiamo appreso che le dinamo possono essere ad eccitazione in serie, in derivazione, o composta (serie-derivazione).

Nel caso di dinamo destinate alla carica di batterie si usa il tipo ad eccitazione derivata o composta. La regolazione della tensione può essere operata a mano od automaticamente.

Per i motivi a suo tempo espressi le dinamo devono necessariamente essere munite di un collettore; questo rappresenta la parte più delicata di una macchina.

Il collettore pertanto deve essere sempre ben pulito, secco e liscio.

Ogni tanto quindi il collettore deve essere accuratamente pulito e anche smerigliato, mediante tela smeriglio finissima (fissata ad una sagoma di legno di raggio eguale a quella del collettore).

Durante la smerigliatura uno straccio leggermente umido di vaselina trattiene la polvere e deterge le lamelle del collettore.

Di quando in quando con apposita lama si deve asportare il grasso grafitoso che si è depositato fra lamella e lamella.

Qualora il collettore risultasse rigato deve essere ritornito, e poi smerigliato.

Elenchiamo alcuni degli inconvenienti più comuni nelle dinamo:

a) *Forte scintillio*: spazzole troppo consumate o non adatte, collettore rovinato, portaspazzole che si è spostato dalla posizione di origine (piano di commutazione errato).

b) *Riscaldamento anormale*: se non si tratta di sovraccarico, o di cuscinetti non lubrificati o rovinati, dipende da un parziale corto circuito fra le spire.

c) *Debole tensione prodotta*: difetto di eccitazione, per guasto al reostato di regolazione, o deficiente contatto dei morsetti.

■ Norme particolari riguardanti i trasformatori

In genere un trasformatore, che funziona con un carico proporzionato alle sue dimensioni costruttive, ha una vita illimitata purchè si tenga opportunamente controllato l'olio contenuto nel cassone il quale deve essere:

a) di colore chiaro e limpido;
b) con bassissima percentuale di acidità;
c) esente da resina, zolfo e derivati;
d) scorrevole anche alle basse temperature;
e) di buona rigidità dielettrica in funzionamento (80 Kv/cm);
f) senza umidità.

A tale scopo ogni due o tre anni è opportuno prelevare un campione dell'olio contenuto nel cassone del trasformatore e farlo analizzare.

Il primo esame consiste nella prova spinterometrica: la scarica fra due sfere del diametro di 10 mm ed alla distanza di 5 mm immerse nell'olio in esame deve avvenire per un valore di tensione superiore a 40.000 Volt come spiegato nel testo Oliva-Cardillo: Elementi di elettrotecnica, pag. 232.

Se la carica avviene per valori di tensione minore, si sottopone l'olio a filtraggio ed essiccazione mediante speciale centrifuga.

CAPITOLO II

MISURE ELETTRICHE

■ Unità di misura

Recentemente si è assunto come sistema di unità di misura il Giorgi modificato, o M.K.S.Q., dove M. indica l'unità di lunghezza metro corrispondente al campione internazionale depositato a Sèvres (Parigi) presso l'Archivio Internazionale di pesi e misure, K. indica il chilogrammo massa ed è l'unità di misura della massa, S. indica l'unità di tempo cioè la 86.400ª parte del giorno solare medio (24 ore), Q. l'unità di carica coulomb che rappresenta la quantità di elettricità relativa al passaggio di una corrente di 1 Ampere nel tempo di 1 secondo.

Da queste unità fondamentali si ricavano le unità derivate.

Nella tabella che segue sono riportate le unità di misura elettriche e meccaniche che interessano il corso. Per ulteriori chiarimenti rimandiamo al testo Oliva-Cardillo: Elementi di elettrotecnica, e ai libri di fisica.

Tabella dei simboli

Grandezza	Simbolo della grandezza e formula di definiz.	Unità	Simbolo dell'unità
Lunghezza	ℓ	Metro	m
Massa	m	Chilogrammo massa	Kg
Tempo	t	Secondo	s
Carica	Q	Coulomb	C
Temperatura	t°	Grado centigrado	C°
Angolo	α	Radiante	r
Area	$S = \ell^2$	Metro quadrato	m^2
Volume	$V = \ell^3$	Metro cubo	m^3

(segue: Tabella dei simboli)

Grandezza	Simbolo della grandezza e formula di definiz.	Unità	Simbolo dell'unità
Velocità	$v = \frac{\ell}{t}$	$\frac{\text{Metro}}{\text{secondo}}$	$\frac{m}{s}$
Accelerazione	$a = \frac{v}{t}$	$\frac{\text{Metro}}{(\text{secondo})^2}$	$\frac{m}{s^2}$
Forza	$F = ma$	Newton o $\frac{\text{Joule}}{\text{metro}}$	N
Potenza	$P = \frac{W}{t}$	Watt	W
Lavoro - Energia - Calore	$W = F \cdot \ell$	Joule	J
Coppia Meccanica	$c = \frac{W}{\alpha}$	$\frac{\text{Joule}}{\text{radiante}}$	$\frac{J}{r}$
Velocità angolare	$\omega = \frac{\alpha}{t}$	$\frac{\text{Radiante}}{\text{secondo}}$	$\frac{r}{s}$
Pressione	$p = \frac{F}{S}$	$\frac{\text{Newton}}{(\text{metro})^2}$	$\frac{N}{m^2}$
Peso specifico	$\gamma = \frac{F}{\ell^3}$	$\frac{\text{Newton}}{(\text{metro})^3}$	$\frac{N}{m^3}$
Intensità di corrente	$I = \frac{Q}{t}$	Ampere	A
Densità di corrente	$\delta = \frac{I}{S}$	$\frac{\text{Ampere}}{(\text{metro})^2}$	$\frac{A}{m^2}$
Tensione, f.e.m.	$V = RI$	Volt	V
Resistenza elettrica	$R = \frac{V}{I}$	Ohm	Ω
Conduttanza	$G = \frac{1}{R}$	Siemens, mho	S
Capacità elettrica	$C = \frac{Q}{V}$	Farad	F
Costante dielettrica	$\varepsilon = \frac{C\ell}{S}$	$\frac{\text{Farad}}{\text{metro}}$	$\frac{F}{m}$
Resistività elettrica	$\rho = \frac{S \cdot R}{\ell}$	Ohm·m	$\Omega \cdot m$

(segue: Tabella dei simboli)

Grandezza	Simbolo della grandezza e formula di definiz.	Unità	Simbolo dell'unità
Conducibilità	$g = \frac{1}{\rho}$	$\frac{\text{Siemens}}{\text{metro}}$	$\frac{S}{m}$
Induttanza	$L = \frac{V \cdot t}{I}$	Henry	H
Mutua induzione	$M = \frac{V \cdot t}{I}$	Henry	H
Flusso magnetico	$\Phi = \frac{V \cdot t}{\text{spire}}$	Weber	Wb
Numero spire	N	Spira	sp
Forza magneto motrice	$\mathcal{F} = NI$	Amperspire	Asp
Induzione magnetica	$B = \frac{\Phi}{S}$	$\frac{\text{Weber}}{(\text{metro})^2}$	$\frac{Wb}{m^2}$
Forza magnetica o campo	$H = \frac{NI}{\ell}$	$\frac{\text{Amperspire}}{\text{metro}}$	$\frac{Asp}{m}$
Permeabilità magnetica	$\mu = \frac{B}{H}$	$\frac{\text{Henry}}{\text{metro}}$	$\frac{H}{m}$
Riluttanza magnetica	$\mathcal{R} = \frac{NI}{\Phi}$	$\frac{\text{Amperspire}}{\text{Weber}}$	$\frac{Asp}{Wb}$
Frequenza	$f = \frac{1}{T}$	$\frac{\text{Periodi}}{\text{secondo}}$	$\frac{p}{s}$; Hz
Periodo	T	Secondi	s
Pulsazione	$\omega = 2\pi f$	$\frac{\text{Radianti}}{\text{secondo}}$	$\frac{r}{s}$
Reattanza induttiva	$x_L = \omega L$	Ohm	Ω
Reattanza capacitiva	$x_C = \frac{1}{\omega c}$	Ohm	Ω
Impedenza	$z = \sqrt{R^2 + x^2}$	Ohm	Ω
Ammettenza	$y = \frac{1}{z}$	Siemens	S
Conduttanza	$G = \frac{R}{R^2 + x^2}$	Siemens	S
Suscettanza	$B = \frac{-x}{R^2 + x^2}$	Siemens	S

Per la resistività ρ la misura pratica è $\Omega mm^2/m$. Per la densità di corrente δ la misura usata è A/mm^2.

Ricordiamo ancora le seguenti unità usate in pratica:

Unità di energia:

1 grande caloria $C = 4.185$ J.
1 piccola caloria $c = 4{,}185$ J.
1 Kgm = 9,81 joule.
1 KWh = 860 grandi calorie = 860×4.185 J = 3.597.100 J.

Unità di potenza:

cavallo vapore = 75 Kgm/s = 736 J/s = 736 Watt.
1 Kgm/s = 9,81 J/s.

Alcune unità della tabella precedente sono elevate, altre sono basse: occorre nella pratica usare i multipli e i sottomultipli.

Ad esempio il farad è una unità elevata e si usano i sottomultipli seguenti:
microfarad = 1 $\mu F = 10^{-6}$ F;
millimicrofarad = 1 $m\mu F = 10^{-9}$ F;
micromicrofarad = 1 $\mu\mu F = 10^{-12}$ F = 1 pF (picofarad).

Per la potenza si usano i seguenti multipli:
Kilowatt = 1 KW = 1.000 Watt;
megawatt = 1 MW = 1.000.000 Watt.

Nella tabella di multipli indichiamo i prefissi dei sottomultipli e multipli più in uso.

Tabella dei multipli

Nomenclatura	Simbolo	Corrispondenza
micromicro o pico	$\mu\mu$ = p	10^{-12}
millimicro	$m\mu$	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
milli	m	10^{-3}
chilo	k	10^{3}
mega	M	10^{6}

■ Apparecchi complementari

Oltre agli strumenti elettrici, che descriveremo in un capitolo a parte, sono necessari alla realizzazione dei circuiti di misura gli interruttori, i derivatori, gli invertitori, i morsetti, le pile, gli accumulatori, i livellatori di tensione, i variatori di tensione, i raddrizzatori, ecc. Alcuni apparecchi sono noti dal corso di elettrotecnica, altri saranno descritti nelle pagine che seguono.

■ Interruttori

Gli interruttori possono essere a coltello, a tasto, a liquido, a spina.

Gli interruttori a coltello detti a sfregamento (fig. 4) sono costituiti da una piastra supporto di materiale isolante portante oltre a due morsetti un sostegno di ottone o di rame crudo (a cui è incernierato un coltello, di ottone o rame crudo) corredato da due lame piegate dello stesso metallo che realizzano contatti a pressione, del tipo a sfregamento, fra il coltello e le lame stesse quando il coltello è abbassato. I due morsetti sono collegati ai contatti. Per l'apertura rapida dell'interruttore una leva con manico isolante comanda il sollevamento rapido del coltello tramite una molla. L'apertura rapida è condizione indispensabile per evitare il formarsi ed il persistere di un arco quando l'interruttore apre circuiti con correnti di una certa intensità.

L'interruttore a tasto a leva (fig. 5), usato per frequenti interruzioni, consta di una piastra supporto isolante, di una leva di ottone comandata da un tasto di materiale isolante che nella parte inferiore porta un contatto di argento spinto dalla leva contro un analogo contatto fisso dello stesso materiale (argento). La leva e il contatto fisso sono collegati a due morsetti.

Altro tipo di interruttore è quello a pozzetti di mercurio (vedi fig. 6). Su una piastra supporto di materiale isolante sono fissati i due recipienti contenenti mercurio, in cui vengono immersi dei conduttori che realizzano collegamenti elettrici a bassissima resistenza di contatto, poichè il mercurio con i conduttori di rame forma un amalgama che impedisce la formazione di ossido. Altro tipo di interruttore è quello a spina, realizzato (vedi fig. 7) collegando i conduttori a due piastrine di ottone che vengono

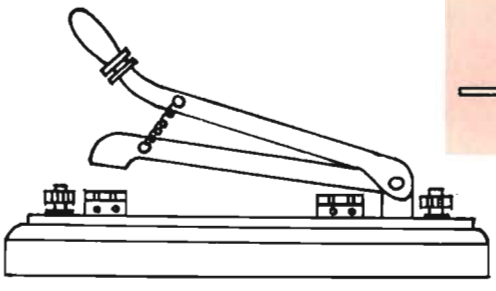


Fig. 4 - Interruttore a leva.

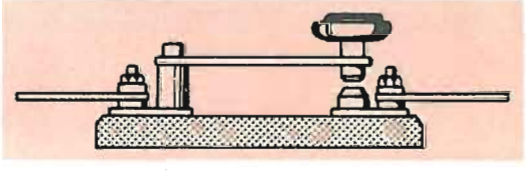
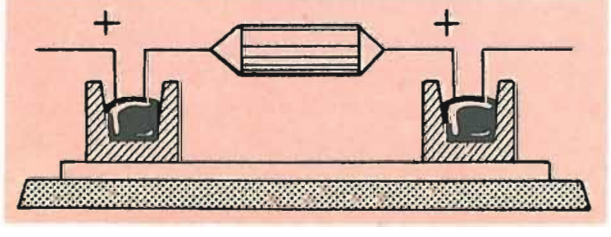


Fig. 5 - Tasto a leva semplice.



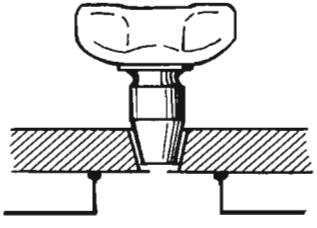


Fig. 7 - Interruttore a spina.

Fig. 6 - Interruttore a pozzetti di mercurio.

messe in contatto da una spina troncoconica di ottone, munita di manico isolante, tale da innestarsi con precisione nella apposita sede pure troncoconica ricavata fra le due piastrine stesse.

■ Morsetti

I morsetti dei vari apparecchi di misura sono formati da un perno filettato di ottone su cui viene avvitato un dado godronato. Fra due ranelle di ottone viene disposto il conduttore avvolto, senza che si sovrapponga, intorno al perno filettato nel senso in cui si avvita il dado di chiusura (fig. 8).

■ Deviatori e invertitori

I deviatori sono accessori che servono a inserire un apparecchio su un circuito o su un altro. Possono essere del tipo a leva, a pressione o a sfregamento (fig. 9), unipolari o bipolari.

Gli invertitori sono apparecchi che permettono di invertire il senso della corrente; ne esistono diversi tipi: a spina, a leva, ecc.

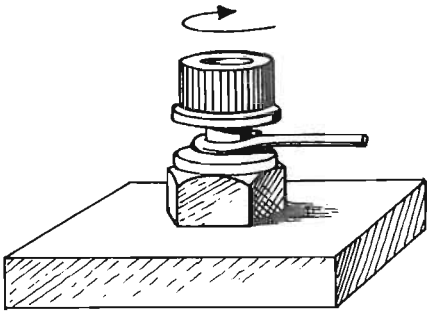


Fig. 8 - Morsetto serrafili.

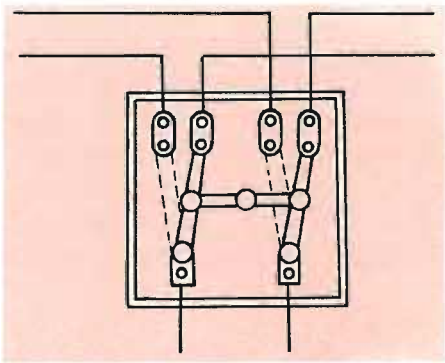


Fig. 9 - Deviatore a sfregamento bipolare.

■ Resistori campioni fissi

Sono dei resistori costituiti da fili o piattine di manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) saldati a grossi perni di rame, a loro volta saldati a grosse sbarre di rame fissate al coperchio isolante di una speciale scatola metallica, contenente il resistore, munita di fori per la dispersione del calore prodotto per effetto joule durante il funzionamento. I morsetti grossi *H* e *K* (fig. 10) terminano con due perni che servono per realizzare dei contatti mediante pozzetti di mercurio. I morsetti piccoli (*x* e *y*) servono per misurare mediante un voltmetro la caduta di tensione ai capi della resistenza, rendendo indipendente la misura dalla resistenza, sia pur limitata, dei morsetti grossi *H* e *K*.

Nel caso di resistenze elevate, dovendo usare filo di manganina, occorre

avvolgere il medesimo in doppio su un supporto cilindrico isolante per ridurre l'effetto della reattanza (vedi fig. 11) durante il funzionamento in c.a.

Per frequenze elevate, per ridurre anche l'effetto capacitivo fra le singole parti di uno stesso filo, si avvolge il medesimo su una piastrina isolante sottile (vedi fig. 12).

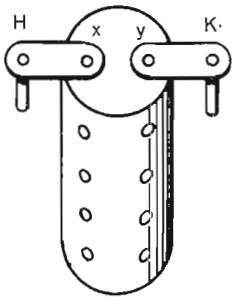


Fig. 10 - Resistenza campione.

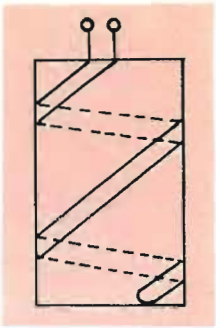


Fig. 11 - Avvolgimento antiinduttivo di resistenza.

I resistori campioni sono costruiti per valori di resistenze che vanno da 0,001 Ω, 0,01 Ω, 0,1 Ω, 1 Ω, 10 Ω, ecc., fino a 1.000.000 Ω.

Ogni campione è accompagnato da una tabella di taratura a 20° centigradi indicante la portata in Ampere e il coefficiente di correzione alle diverse temperature.

■ Reostati campioni a cassetto

I reostati campioni a cassetto sono apparecchiature il cui valore di resistenza può essere variato entro certi limiti; si dividono in cassette di resistenze a spine, a spine a decadi lineari, a decadi circolari o a manopole.

I reostati a contatti a spine normali, detti anche cassette di resistenze a spine, risultano costituiti da un certo numero di resistori in filo di materiale ad alta resistività con basso coefficiente di temperatura (vedi il volume Oliva-Cardillo: Elementi di elettrotecnica, pag. 47), cioè da leghe come manganina (già visto), costantana (54% Cu, 46% Ni), ecc., materiali il cui valore di resistività si mantiene abbastanza costante al variare della temperatura e quindi al passaggio della corrente.

Ogni resistore, avvolto in doppio senso (vedi fig. 13) per evitare l'effetto dell'induttanza quando viene percorso dalla corrente alternata, ha un valore di resistenza ben determinato e fa capo a due piastrine di ottone disposte sul coperchio di materiale isolante.

Ogni spina, munita di manico isolante, cortocircuita, se inserita fra le due piastrine nella apposita sede troncoconica, il

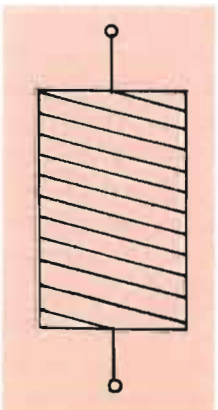


Fig. 12 - Avvolgimento anticapacitivo di una resistenza.

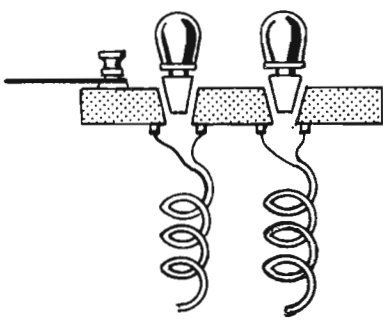


Fig. 13 - Disposizione dell'avvolgimento in doppio.

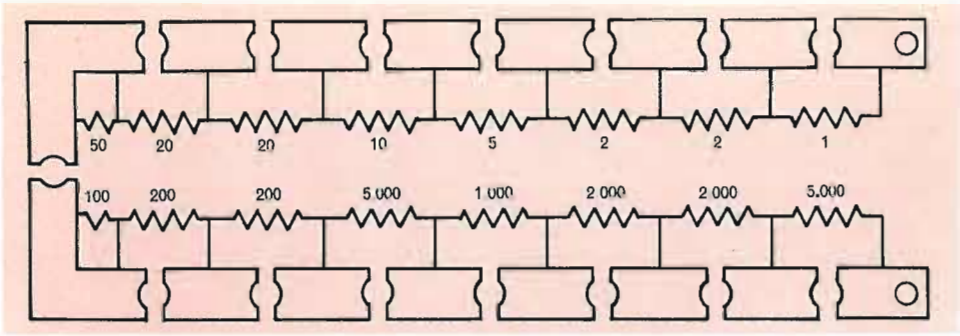


Fig. 14 - Cassetta di resistenza con contatti a spina.

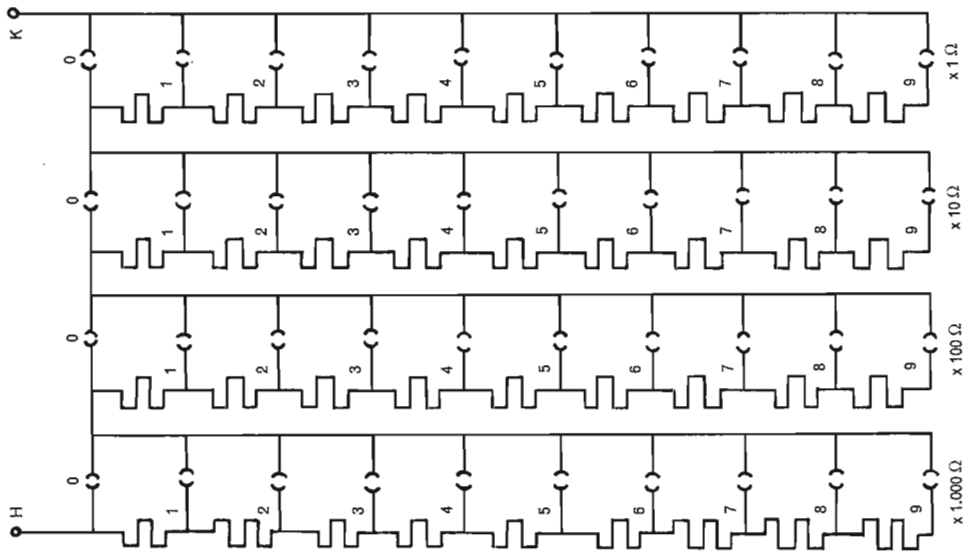


Fig. 15 - Cassetta di resistenza a decadi lineari.

resistore corrispondente. Inserendo o disinserendo più spine si può variare il valore della resistenza del reostato. Con le spine tutte escluse il reostato presenta tutti i singoli resistori in serie e quindi offre la massima resistenza.

Esternamente la cassetta risulta di legno con coperchio isolante (come si è visto), su cui si trovano le piastrine di ottone con le sedi per le spine e i morsetti terminali. La fig. 14 rappresenta un reostato a cassetta a spine il cui valore di resistenza è complessivamente di 11.110 Ω a spine tutte escluse. Le cassette a spine, i cui singoli rami sono costituiti da nove resistori tutti uguali, prendono il nome di cassette di resistori a decadi lineari. Nell'esempio in fig. 15 il primo ramo ha 9 resistori da 1 Ω ciascuno, il secondo 9 resistori da 10 Ω, il terzo 9 resistori da 100 Ω, il quarto ramo ha 9 resistori da 1000 Ω. Nel primo ramo a spine escluse si ha una resistenza

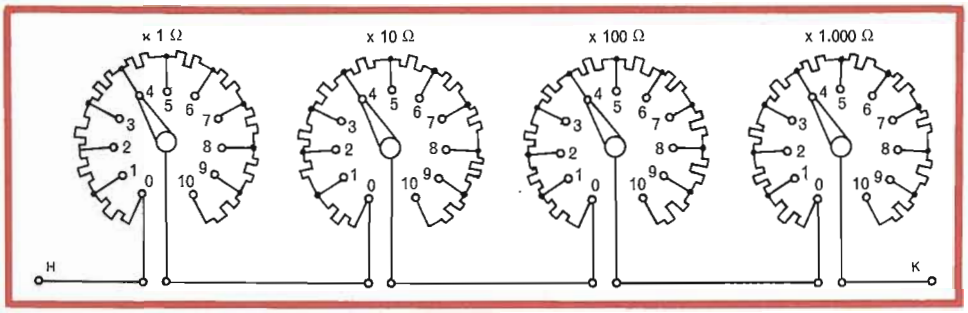


Fig. 16 - Cassetta di resistenza a decadi circolari.

di 9 Ω complessivamente, nel secondo di 90 Ω, nel terzo di 900 Ω, nel quarto di 9000 Ω; si ottiene così a spine tutte escluse 9999 Ω di resistenza globale.

Esiste un altro tipo di cassette di resistenze che prendono il nome di cassette a decadi circolari a manopole o reostati a decadi circolari; esse in genere sono formate da quattro decadi ciascuna, con 11 contatti per decade costituiti da bottoni di ottone disposti secondo una circonferenza sopra un coperchio di materiale isolante. I singoli resistori in numero di 10 per ogni decade sono tutti uguali fra di loro (vedi fig. 16). Una manopola (per ogni decade) con impugnatura in materiale isolante (un disco godronato) trascina il contatto a spazzola costituito da lamelle di ottone che strisciano sui contatti collegati alle resistenze. Le manopole portano in genere un indice per mezzo del quale si legge il numero d'ordine del resistore inserito. Moltiplicando questo numero per il numero della decade ($\times$ 1 Ω, $\times$ 10 Ω, $\times$ 100 Ω, $\times$ 1.000 Ω) si ha il valore della resistenza inserita per ogni singola decade. Sommando i valori ottenuti delle singole decadi si ottiene la resistenza risultante inserita fra i morsetti estremi *H* e *K*, poichè, come indica lo schema, le decadi sono collegate fra di loro in serie. La posizione di zero di una manopola esclude completamente la decade relativa.

Per le cassette di resistenze esistono 3 classi di precisione (vedi oltre): la classe 0,1 con errori assoluti dello 0,1% della portata dello strumento, la classe 0,05 con errori dello 0,05%, la classe 0,02 con errori dello 0,02%. Le cassette sono munite di tabelle di taratura con indicazioni relative alla portata massima della corrente in Ampere, all'errore massimo di taratura, al coefficiente di correzione per le variazioni di temperatura (il valore delle resistenze è sempre riferito a 20° centigradi).

■ Reostati a cursore

I reostati a cursore sono costruiti in modo da poter variare a piacere la loro resistenza; sono costituiti da un filo di nichelina o di costantana, (80% Ni, 20% Cr) oppure di argentana. Pertanto si usano materiali di

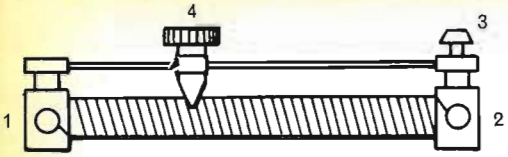


Fig. 17 - Reostato a cursore semplice.

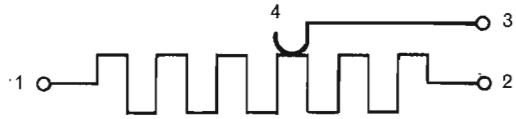


Fig. 18 - Schema elettrico reostato a cursore.

elevata resistività, avvolti a spirale su di un supporto isolante (ardesia, porcellana, steatite) e termina con due morsetti 1 e 2 (vedi fig. 17).

Su apposita guida metallica scorre un cursore di ottone dal manico isolante munito di due lamelle atte ad assicurare un contatto strisciante fra il filo avvolto a spirale e la guida metallica. Pertanto il cursore è elettricamente collegato al morsetto 3. Se vengono collegati i morsetti 1 e 2 (vedi fig. 18) l'intero reostato risulta inserito come resistore di valore fisso; se invece si collegano i morsetti 1 e 3 risulta esclusa la parte fra 1 e 3 del reostato e si può così ottenere un valore variabile a piacere. Un'apposita targhetta indica il valore massimo della resistenza in Ω, e la corrente massima che il reostato può sopportare con funzionamento continuo.

■ Errore nella esecuzione delle misure

Per effettuare una misura occorre innanzi tutto scegliere il metodo più adatto in relazione al tipo di grandezza che si vuole misurare.

Malgrado questo accorgimento la misura sarà inevitabilmente soggetta a due tipi di errori: quelli *sistematici* e quelli *casuali*.

Gli errori sistematici dipendono dal tipo e dal metodo di misura scelti, e possono essere ridotti scegliendo con oculatezza lo strumento più adatto alla misura da compiere.

Gli errori casuali, invece, sono dovuti ad un numero indefinito di fenomeni che si sovrappongono sempre a quello in esame alterandone leggermente la rilevazione. A differenza di quanto capita per gli errori sistematici, agli errori casuali non si può mai porre alcun rimedio, poichè essi non dipendono solo dallo sperimentatore e dagli strumenti usati ma anche e in misura essenziale dal fenomeno in esame.

Tuttavia poichè nella stragrande maggioranza dei casi gli errori casuali portano con uguale probabilità a misure di valori leggermente superiori o leggermente inferiori al *valore effettivo* della grandezza, si può definire *misura della grandezza* in esame il valore della media aritmetica di un numero più grande possibile di rilevazioni. Si definiscono poi altre grandezze.

L'**errore assoluto** (e_a) *è la differenza fra il valore indicato dallo strumento e il valore effettivo*, valore quest'ultimo ricavato da uno strumento campione, o assunto uguale alla misura della grandezza definita come sopra.

L'**errore relativo** (e_r) *è il rapporto fra l'errore assoluto e il valore effettivo* (V_e). Chiamato con V_i il valore indicato dallo strumento, potremo scrivere:

$$e_a = V_i - V_e, \quad e_r = \frac{V_i - V_e}{V_e};$$

$$e\,\% = \frac{V_i - V_e}{V_e}\ 100.$$

Esempio: si debba misurare la corrente di un circuito, lo strumento campione indica 0,02 Ampere, lo strumento di uso normale indica 0,022 Ampere, avremo:

$$e_a = 0{,}022 - 0{,}02 = +\ 0{,}002 \text{ Ampere},$$

$$e_r = \frac{0{,}022 - 0{,}02}{0{,}02} = +\ \frac{0{,}002}{0{,}02} = +\ 0{,}1,$$

$$e\ \% = e_r\ 100 = +\ 10\ \%$$

(errore percentuale assai elevato che sconsiglierebbe l'impiego dello strumento scelto per questo tipo di misura).

■ Strumenti di misura

Si possono suddividere in base al loro impiego e cioè in dicatori, registratori, integratori.

■ Principio di funzionamento generale per tutti gli strumenti

La corrente della quale si vuole conoscere il valore percorre l'avvolgimento di una bobina che può essere mobile o fissa, capace di creare un campo elettromagnetico proporzionale alla corrente stessa.

Questo campo si compone con il campo principale dell'apparecchio, che può essere magnetico od elettromagnetico, provocando una coppia cui si oppone una molla tarata od altri dispositivi equivalenti.

Smorzamento

L'equipaggio mobile ruotando intorno al proprio asse per raggiungere le condizioni di equilibrio con la molla antagonista diventa sede di oscillazioni tanto più numerose quanto maggiore è la sensibilità dello strumento.

Queste oscillazioni rendono però spesso disagevole la lettura, per cui i costruttori ricorrono a *dispositivi di smorzamento*.

Questi dispositivi cercano di frenare il movimento dell'indice in modo da impedire che compia anche una sola oscillazione intorno alla posizione di equilibrio (*smorzamento critico*).

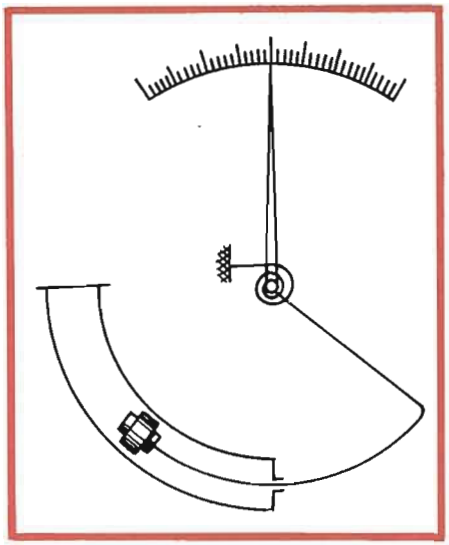


Fig. 19 - Smorzatore a resistenza d'aria a stantuffo.

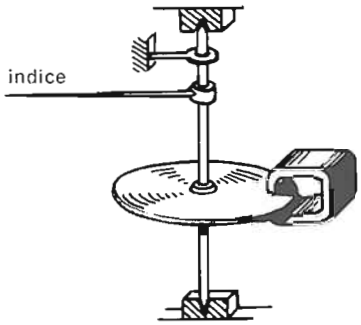


Fig. 20 - Smorzamento elettromagnetico.

Fra i principali smorzatori elenchiamo i seguenti:

— *smorzatori a resistenza d'aria*: si tratta di una paletta che si muove entro un canale di ampiezza di poco superiore a quella della paletta (fig. 19).

— *smorzatori a liquido*: un piccolo stantuffo scorre in un tubo le cui pareti sono di poco superiori a quelle dello stantuffo.

Il tubo è riempito di un liquido (olio o glicerina). Naturalmente l'azione di smorzamento è molto più energica usando il liquido anzichè l'aria.

— *smorzatori elettromagnetici*: si tratta di un leggero disco di alluminio che ruota entro le espansioni polari di un magnete (fig. 20).

La coppia frenante è proporzionale alla velocità di rotazione del disco. Il principio di funzionamento si basa sulla legge di Lenz e sulle correnti di Foucault.

■ Sensibilità e precisione degli strumenti

Spesso si è indotti ad identificare tra loro questi due concetti in realtà diversissimi.

La **sensibilità** di uno strumento è la minima quantità che può essere letta sulla scala, cioè è il valore misurato da una tacca del quadrante.

La sensibilità può essere misurata in tre modi tra loro equivalenti: considerando, come si è detto, la quantità misurata da una tacca del quadrante (p. es. un milliamperometro, il cui valore di fondo scala sia di 1 mA e che sia dotato di una scala con 50 tacche ha una sensibilità di $1/50 = 20\ \mu A$), considerando direttamente il valore del fondo scala, op-

pure, infine, in Ω/V (ohm per Volt). Quest'ultimo metodo, che è quello più comunemente usato per indicare la sensibilità di strumenti tipo tester e amperometri, è strettamente legato al valore della corrente che percorre lo strumento a fondo scala. Infatti si ha:

$$\Omega/V = \frac{1}{A \text{ (fondo scala)}}.$$

Il numero di Ω/V è ovviamente tanto maggiore quanto più lo strumento è sensibile.

I normali tester hanno una sensibilità di circa 20.000 ÷ 30.000 Ω/V, quelli elettronici di 7,5 ÷ 11 MΩ/V (milioni di ohm per Volt).

La **precisione** di uno strumento è l'errore massimo con il quale presumibilmente esso può compiere la rilevazione ed è legata all'accuratezza con la quale lo strumento è stato costruito.

Ai fini della misura ottenuta, gli errori dovuti alla mancanza di precisione dello strumento sono da considerarsi errori sistematici.

■ Classi di precisione

Secondo le norme stabilite dal Comitato Elettrotecnico Italiano gli strumenti indicatori e registratori vengono classificati in cinque classi:

0,2 — 0,5 — 1 — 1,5 — 2,5 *in base al loro grado di precisione.*

Questi numeri rappresentano il massimo dell'errore assoluto possibile in un qualsiasi punto della scala, espresso in errore percentuale massimo del valore di fondo scala.

Così ad esempio se lo strumento è della classe 1 e ha una portata di f.s. di 100 Ampere, l'errore assoluto sarà contenuto in qualunque punto della scala come segue:

$$e_a = + \frac{1 \times 100}{100} = 1 \text{ Ampere};$$

e l'errore percentuale:

$$e\% = \frac{1}{100} 100 = 1\%.$$

Gli strumenti della classe di precisione 0,2 vengono usati come strumenti da laboratorio e per i collaudi, quelli della classe 0,5 e 1 come strumenti portatili per il controllo degli impianti, quelli della classe 1,5 e 2,5 vengono usati come strumenti da quadro.

■ Autoconsumi

Rappresentano le perdite che ogni strumento provoca a causa del proprio circuito cioè la potenza elettrica dissipata per effetto Joule internamente ad ogni strumento; precisamente avremo:

$$\text{Amperometri } P_a = r_a I^2 \text{ Watt};$$

$$\text{Voltmetri } P_v = \frac{V^2}{r_v} \text{ Watt};$$

$$\text{Wattmetri } P_a + P_v = P_w;$$

$$v_a = r_a I \text{ caduta tensione dello strumento;}$$

$$i_r = \frac{V}{r_v} \text{ corrente assorbita dallo strumento.}$$

■ Shunt

Gli shunt sono apparati destinati ad aumentare la portata degli strumenti generalmente usati per la misura in circuiti a corrente continua (fig. 21).

Si definisce *rapporto moltiplicatore* dello shunt il rapporto

$$m = \frac{R_s + R_a}{R_s}$$

dove R_s indica la resistenza dello shunt ed R_a la resistenza interna dello strumento.

Si definisce *costante* K di uno strumento il rapporto tra il valore numerico indicato dall'indice ed il valore effettivo della grandezza misurata.

Si definisce *costante dello strumento avente lo shunt inserito*

$$K_1 = mK$$

dove K è la costante dello strumento.

Lo strumento viene tarato dalla Casa costruttrice assieme allo shunt.

■ Resistenze addizionali

Sono resistenze tarate che vengono collegate in serie agli strumenti per aumentare la portata voltmetrica dello strumento.

Il valore della resistenza addizionale sarà dato da:

$$R_a = \frac{V - v}{v} R_v$$

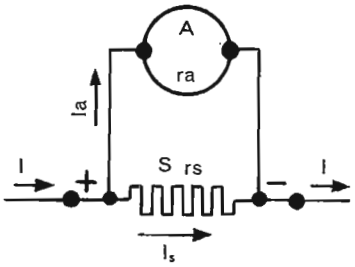


Fig. 21 - Amperometro con schunt.

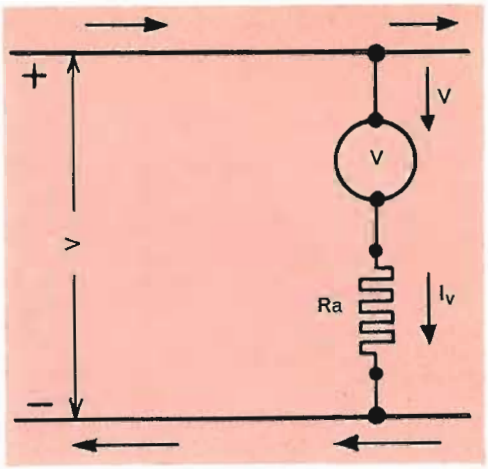


Fig. 22 - Voltmetro con resistenza addizionale.

dove:

V è il valore massimo della tensione da misurare;

v è il valore di f.s. dello strumento;

R_v la resistenza interna del voltmetro.

Il rapporto moltiplicatore è dato da:

$$m = \frac{V}{v}.$$

La nuova costante del complesso diventa:

$$K_1 = mK$$

dove K è la costante dello strumento.

■ Trasformatori di misura

Sono apparati usati evidentemente solo per i circuiti in corrente alternata per variare la portata degli amperometri e dei voltmetri.

Questi trasformatori portano indicati il fattore di moltiplicazione e la massima portata in Ampere o in Volt a seconda dell'impiego.

Lo schema accanto (fig. 23) rappresenta un riduttore della portata massima di 150 A con rapporto nominale di trasformazione

$$K_n = \frac{150}{5} = 30.$$

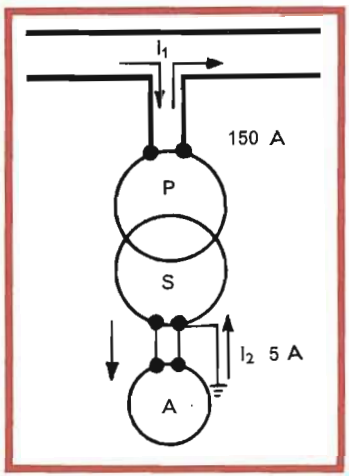


Fig. 23 - Schema d'inserzione di un trasformatore di corrente.

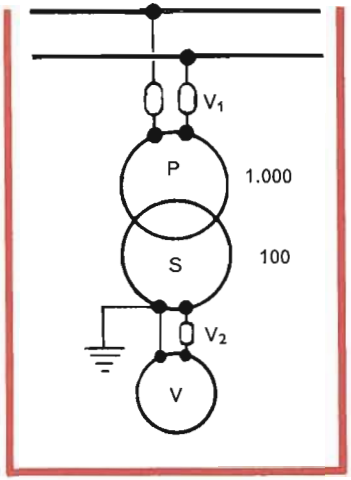


Fig. 24 - Schema d'inserzione di un trasformatore di tensione.

Quindi la costante K_1 di fondo scala diventerà

$$K_1 = 5 \cdot 30 = 150.$$

In altri termini quando lo strumento indicherà il valore 5, nella linea avremo una intensità di 150 Ampere.

Lo schema (fig. 24), che viene utilizzato per la misura della tensione di una linea, indica ad esempio un riduttore di tensione della portata massima di 1000 Volt.

Il rapporto di trasformazione risulta quindi:

$$K_n = \frac{1000}{100} = 10.$$

Pertanto quando l'indice dello strumento sarà sulla posizione 100 il reale valore della tensione sarà:

$$100 \times 10 = 1000 \text{ Volt.}$$

Elementi necessari per definire le caratteristiche dei trasformatori di misura sono:

1) *Tensione massima di esercizio* (V_e).

2) *Correnti nominali*: primaria (I_1) e secondaria (I_2) valori che vengono indicati sulla targa dei TA.

3) *Tensioni nominali*: primaria (V_1) e secondaria (V_2) valori che vengono indicati sulla targa dei TV.

4) *Rapporto nominale*:

$$\text{per i } TA \quad K_n = \frac{I_1}{I_2};$$

$$\text{per i } TV \quad K_n = \frac{V_1}{V_2}.$$

5) *Rapporto effettivo* K: rapporto fra le grandezze reali.

6) *Errori di rapporto*:

$$e_k = 100 \frac{K_n - K}{K};$$

ovvero per TA:

$$e_k = 100 \frac{K_n(I_2 - I_1)}{I_1};$$

per TV:

$$e_k = 100 \frac{K_n(V_2 - V_1)}{V_1}.$$

7) *Errore d'angolo*: è lo spostamento angolare (ε) fra il vettore che rappresenta la grandezza primaria ed il vettore (rovesciato) della grandezza secondaria (fig. 25), espresso generalmente in centiradianti (1 *primo* = 0,029 *centiradianti*). Questo errore determina un errore di fase quando si debbano misurare delle potenze.

8) *Prestazioni*: la potenza apparente dei trasformatori di misura definita dal numero di VA (voltampere) indica anche il valore della prestazione da parte dei trasformatori, per l'alimentazione dei rispettivi strumenti.

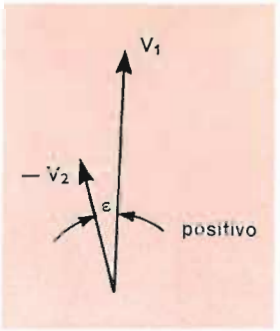


Fig. 25 - Angolo di sfasamento fra tensione di linea e tensione letta.

■ Classe di precisione dei trasformatori di misura

Il Comitato Elettrotecnico Italiano ha stabilito delle norme e delle classi di precisione per ogni tipo di apparecchio; *le classi sono contraddistinte dalle lettere S.P.Q.R.* e precisamente:

per i TA:

classe	S =	± da 0,5 a 0,2%	
	P =	± da 1 a 0,5%	
	Q =	± da 2 a 1%	(strumenti da quadro)
	R =	± da 2 a 1%	(relè)

per i TV:

classe	S =	± 0,2%	
	P =	± 0,5%	
	Q =	± 1%	(strumenti da quadro)
	R =	± 1%	(relè)

(vedi la tabella simbolica degli strumenti pag. 54).

TIPI PRINCIPALI DI STRUMENTI

■ Voltometri, amperometri, wattmetri e strumenti affini

a) Magnetoelettrici a bobina mobile (Weston)

Il funzionamento si basa sull'azione magnetoelettrica fra una bobina mobile percorsa dalla corrente da misurare ed un campo magnetico permanente (fig. 26).

Funzionano solo con corrente continua.

La loro scala è lineare (fig. 27, fig. 28 e fig. 29).

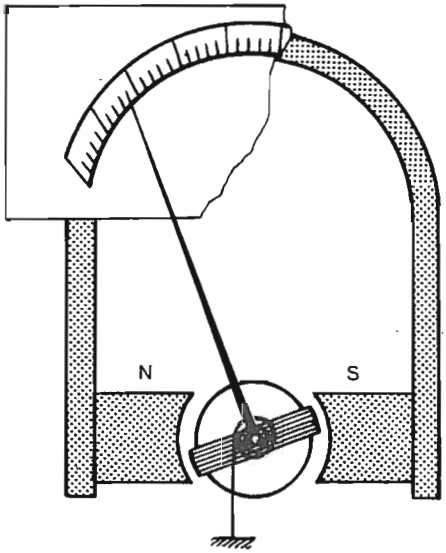


Fig. 26 - Strumento magnetoelettrico.

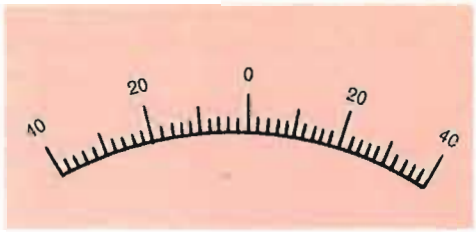


Fig. 27 - Scala a zero centrale.

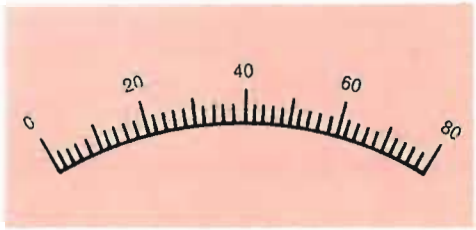


Fig 28 - Scala uniforme a zero iniziale.

Strumenti più impiegati: galvanometri, milliamperometri, amperometri, millivoltmetri, voltmetri; hanno piccolo autoconsumo ed il loro grado di precisione è elevato.

b) *Elettromagnetici o a ferro mobile*

Il funzionamento si basa sull'azione elettromagnetica fra un elettromagnete ed una ancoretta di ferro mobile che si magnetizza per induzione.

Funzionano sia con corrente alternata che con corrente continua. Quando la bobina *S* è percorsa dalla corrente magnetizza l'elemento *F* ad essa ancorato, e quello mobile *M* applicato all'indice (fig. 30).

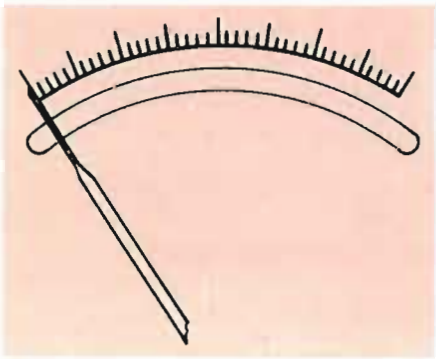


Fig. 29 - Scala a specchio con indice a coltello.

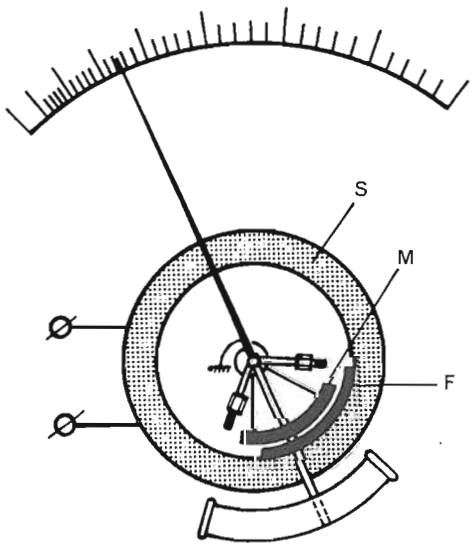


Fig. 30 - Strumento elettromagnetico a ferro mobile.

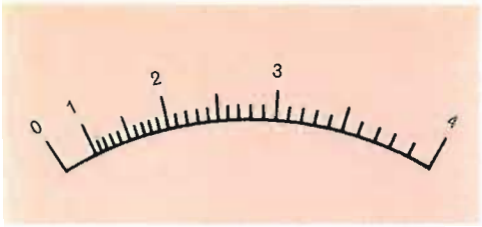


Fig. 31 - Scala quadratica.

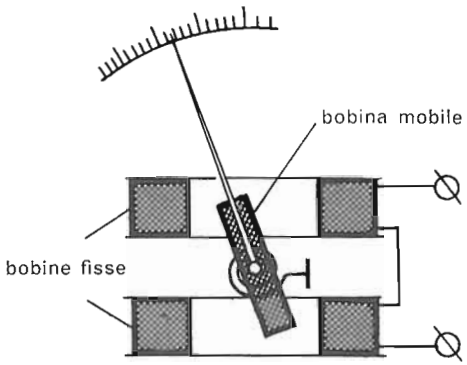


Fig. 32 - Wattmetro elettrodinamico.

Poichè i due ferri M e F sono magnetizzati nello stesso senso si respingono con una forza proporzionale alla corrente.

La scala è del tipo quadratico (fig. 31). Gli strumenti di questo tipo vengono impiegati come voltmetri ed amperometri; non sono molto precisi ma robusti.

c) *Elettrodinamici*

Sono costituiti da una o due bobine fisse e da una bobina mobile che ruota assieme all'indice (fig. 32).

Quest'ultima ruota per effetto elettrodinamico.

Strumenti impiegati principalmente come wattmetri, possono però essere anche impiegati come voltmetri, amperometri o contatori. Hanno un consumo elevato.

d) *A filo caldo*

Sono costituiti da un filo che percorso dalla corrente si deforma per effetto termico (Joule).

Strumenti di scarsa precisione sono usati come voltmetri e come amperometri nei circuiti ad alta frequenza e in corrente continua; hanno notevole autoconsumo e la scala è di tipo quadratico (fig. 33).

e) *Elettrostatici*

Principalmente usati come misuratori di differenza di potenziale, essi sono costituiti da una armatura fissa e da una mobile collegata all'indice.

L'azione di attrazione, funzione dell'intensità di campo elettrico, fra la parte fissa e quella mobile determina la rotazione dell'indice.

La scala con particolari accorgimenti risulta quasi lineare (fig. 34).

Questi strumenti vengono usati come voltmetri per tensione continua o alternata; non hanno autoconsumo.

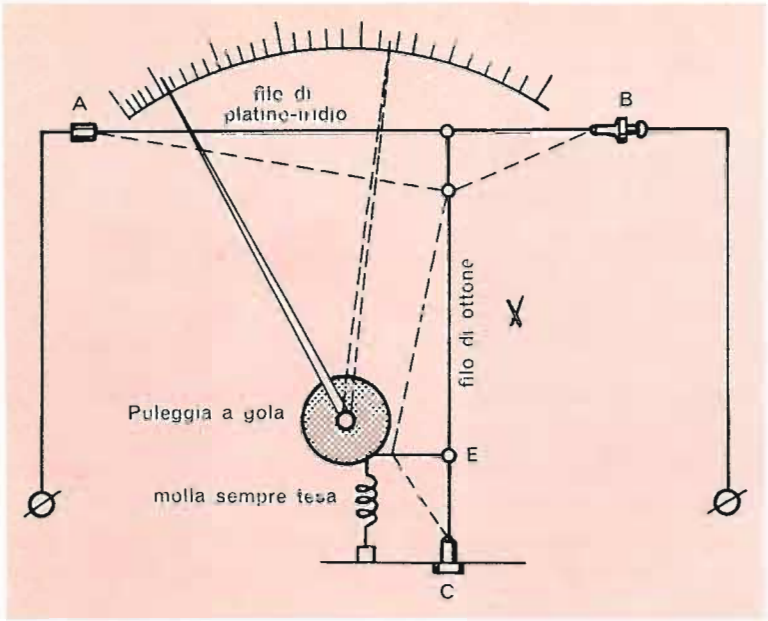


Fig. 33 - Strumento a filo caldo.

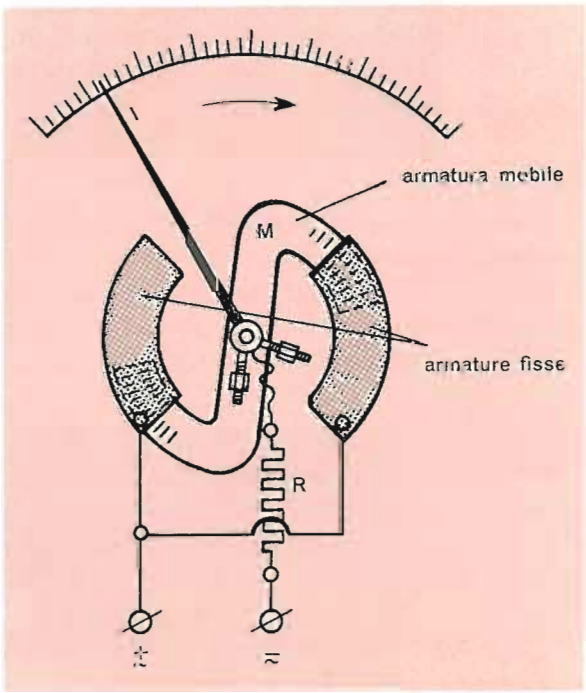


Fig. 34 - Voltmetro elettrostatico.

f) *A induzione*

Sono costituiti da due elettromagneti che agiscono su un disco di alluminio, frenato da una molla a torsione (fig. 35).

Il disco muove l'indice. L'azione fra il campo elettromagnetico prodotto dagli elettromagneti e le correnti parassite indotte nel disco provoca una rotazione del disco. Funzionano quindi solo con corrente alternata. La scala è del tipo quadratico. Questi strumenti vengono impiegati come wattmetri, amperometri o contatori: in tal caso non hanno la molla antagonista e invece dell'indice e della scala sono muniti di vite senza fine che aziona un numeratore. Hanno forte autoconsumo.

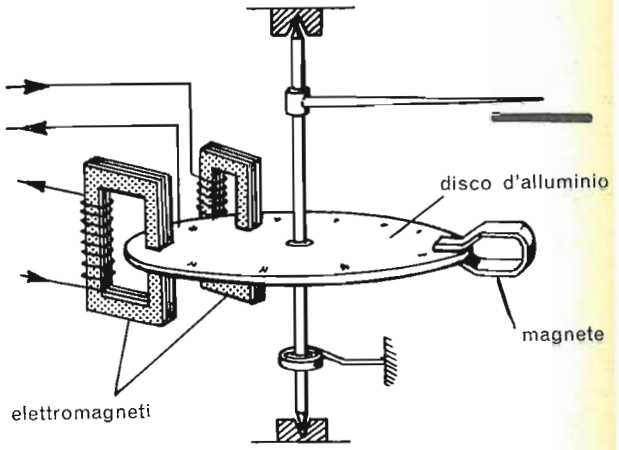


Fig. 35 - Strumento ad induzione.

■ Frequenziometri

Servono per indicare la frequenza della rete corrente alternata. Il tipo più diffuso e che dà migliori risultati è quello a lamelle vibranti. Si tratta di un apparecchio dotato di una serie di lamelle di acciaio di opportuna lunghezza in modo da avere ciascuna un proprio periodo di vibrazione (fig. 36 e 37). Quando questo complesso di lamelle è investito da un campo elettromagnetico periodico, entra in vibrazione e la lamella, il cui periodo proprio di oscillazione coincide con quello del campo, avrà una maggiore ampiezza di movimento, indicando così con esattezza la corrispondente frequenza della corrente. Sono strumenti insensibili alle variazioni della tensione; hanno piccolo autoconsumo.

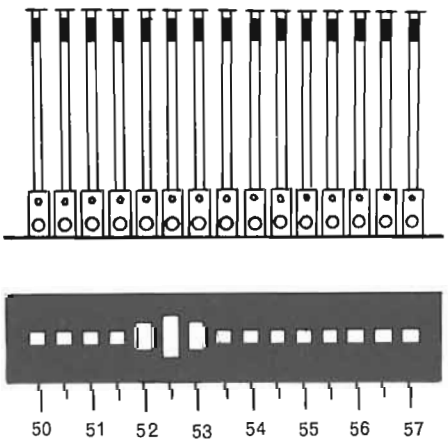


Fig. 36 - Frequenziometro a lamelle vibranti

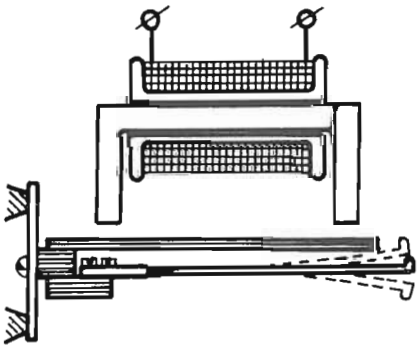


Fig. 37 - Bobina di eccitazione del frequenziometro.

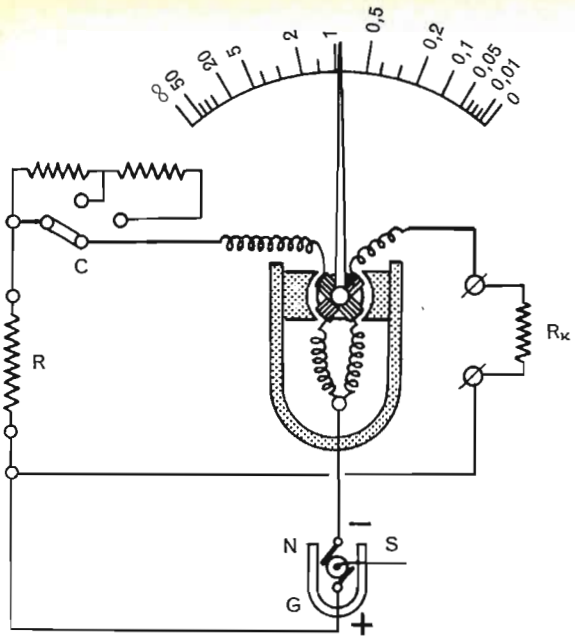


Fig. 38 - Megaohmmetro a bobine incrociate.

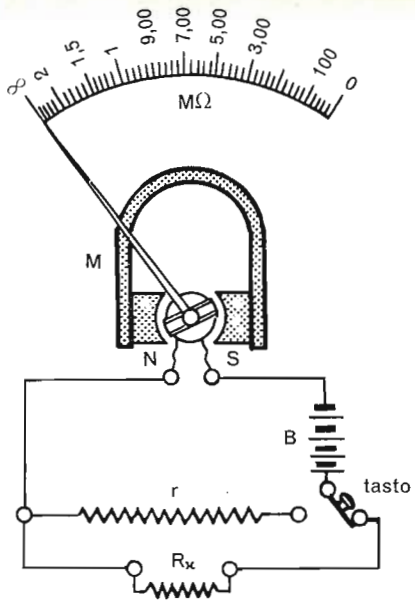


Fig. 39 - Ohmmetro amperometrico.

■ Ohmmetri

Servono per la misura di grandissime resistenze.

Il circuito è rappresentato dallo schema (fig. 38 e fig. 39). Gli strumenti sono del tipo galvanometrico con scala tarata in ohm o in megaohm, ed hanno in serie una resistenza campione di taratura *R*. Gli apparecchi sono alimentati da una batteria. In altri strumenti la pila è sostituita da una dinamo magnetoelettrica azionata a mano.

L'equipaggio mobile è costituito da due bobine incrociate e non possiede molle antagoniste.

Una bobina alimenta una resistenza campione, e costituisce col suo campo di reazione la coppia antagonista, la seconda bobina alimenta il circuito di cui si vuole conoscere la resistenza. Con questo sistema l'indicazione dello strumento risulta praticamente indipendente dalla velocità della dinamo di alimentazione.

■ Contatori per corrente continua detti contatori elettrodinamici o wattorametri

Il contatore per corrente continua (vedi fig. 40) risulta costituito da una parte rotante la cui forma ricorda i rotori a tamburo delle macchine a c.c.; infatti è munito di un collettore a lamelle d'argento su cui due spazzole a lamine di argento strisciando adducono una corrente funzione della

tensione; quindi il rotore è in parallelo alla rete. Due bobine amperometriche vengono percorse dall'intera corrente di linea essendo collegate in serie alla medesima. Completa lo strumento un disco di rame o di alluminio che ruota fra le espansioni polari di un magnete permanente.

Tagliando il disco durante la sua rotazione il flusso creato da detto magnete diviene nelle parti interessate sede di f.e.m. indotte che provocano correnti che per la legge di Lenz si oppongono alla causa che le ha generate frenando il disco.

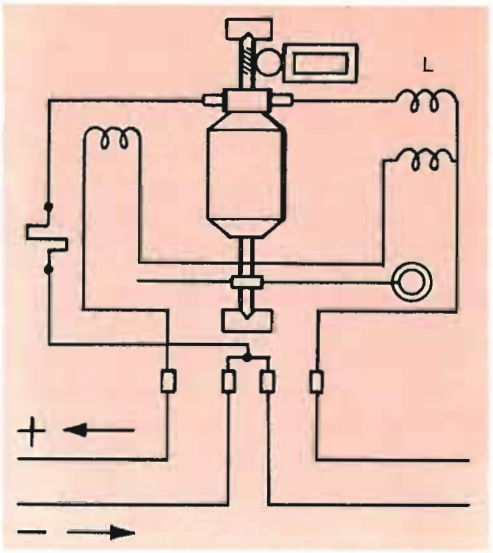


Fig. 40 - Contatore elettrodinamico per corrente continua.

Una vite senza fine calettata sull'albero del disco aziona un numeratore che registra l'energia consumata. Per differenza fra la lettura eseguita in due tempi successivi si determina l'energia consumata durante un determinato periodo (espressa in kWh). Il magnete permanente evita che il disco continui la sua rotazione per inerzia anche quando il carico è staccato e permette la taratura del contatore che si effettua spostando, mediante vite, la posizione del magnete permanente rispetto all'asse del disco. Il rotore ruota per effetto della coppia che nasce fra il flusso induttore e la corrente funzione della tensione che alimenta gli avvolgimenti rotorici. Una bobina *L* in serie alle spazzole genera un flusso capace di creare una coppia compensante quella d'attrito.

■ Contatori a induzione per correnti alternate

Si tratta di strumenti simili a quelli già studiati (vedi fig. 35); però l'indice e la scala con la molla antagonista sono sostituiti da una vite senza fine e da un numeratore che segna direttamente i KWh consumati (fig. 41). Un magnete permanente funge da freno al disco di alluminio e ha la funzione di regolarne la rotazione. Una vite permette di spostare il magnete rispetto al disco regolandone l'azione frenante. Il magnete permanente blocca il disco quando non vi è assorbimento di corrente.

L'energia consumata si computa per differenza fra una lettura e quella eseguita in un tempo successivo. Il principio di funzionamento è identico a quello degli strumenti a induzione. Due elettromagneti generano due flussi variabili sfasati di un certo angolo e quindi creano un campo rotante che interessando il disco dà origine ad una f.e.m. indotta ed alle relative

correnti indotte, capaci di produrre una coppia che fa ruotare il disco e quindi il numeratore mediante la vite senza fine. Un avvolgimento amperometrico, dell'elettromagnete (fig. 41) è collegato in serie alla linea ed è riconoscibile perchè è di filo grosso, mentre l'altro avvolgimento, voltmetrico, in derivazione alla linea, è costituito da filo sottile e lungo, dovendo presentare una elevata resistenza. La coppia motrice risulta in questo caso proporzionale alla potenza assorbita in ogni istante $P = VI \cos \varphi$.

■ Fasometri

Per misurare il fattore di potenza di una linea esistono strumenti — detti fasometri — che danno per lettura diretta il cos φ o l'angolo φ di sfasamento fra tensione e corrente. Sono costituiti (vedi fig. 42) da una bobina fissa collegata in serie alla linea e da due bobine fra loro incrociate che formano l'equipaggio mobile solidale con l'indice, e sono alimentate in derivazione dai due fili di linea, una attraverso una induttanza e la seconda attraverso una resistenza; le due correnti che le percorrono sono la prima in ritardo sulla tensione, la seconda in fase.

Fra la bobina fissa e le bobine incrociate nasce una coppia che tende a fare ruotare l'equipaggio mobile in un senso o nell'altro a seconda che si tratti di un carico capacitivo o induttivo. Il fasometro descritto è del tipo monofase; esistono anche fasometri trifasi per carichi simmetrici ed equilibrati (vedi fig. 43) costituiti da una bobina amperometrica a da due voltmetriche. Si costruiscono anche fasometri trifasi per carichi squilibrati.

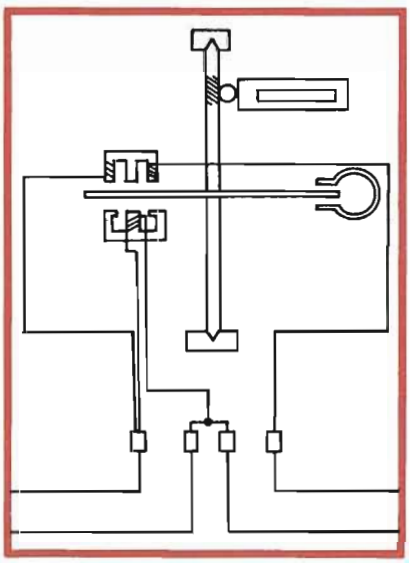


Fig. 41 - Contatore ad induzione per corrente alternata.

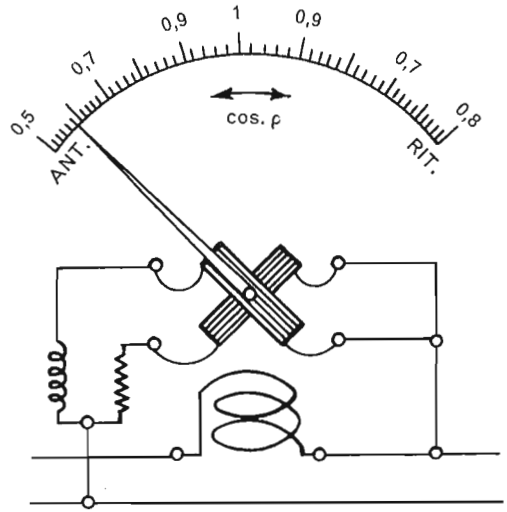


Fig. 42 - Cosfimetro monofase.

■ Regolatori ad induzione

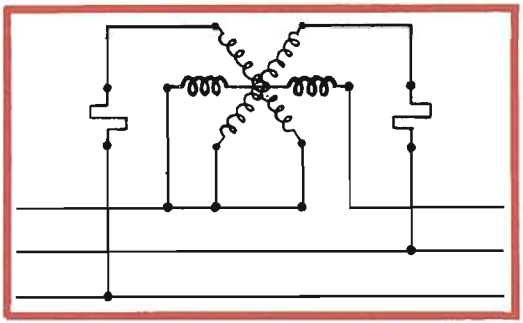


Fig. 43 - Schema elettrico fasometro trifase.

I regolatori ad induzione provocano variazioni di tensione di una linea componendole vettorialmente con le tensioni da essi prodotte per induzione in modo da dare valori di tensione comunque variabili.

Questi regolatori ad induzione possono essere del tipo monofase e del tipo trifase; sono costruiti in modo simile ai motori asincroni cioè formati da uno statore e da un rotore.

Il tipo monofase ed il tipo trifase sono tra di loro sostanzialmente assai simili. Noi parleremo del tipo trifase perchè più diffuso nel campo industriale. Esso è costituito da due avvolgimenti: quello rotorico generalmente derivato dalla linea di alimentazione e quello statorico collegato in serie fra la linea di alimentazione ed il circuito secondario. Quando gli assi dei due rispettivi avvolgimenti, statorico e rotorico, coincidono, quasi tutto il flusso dovuto alle amperspire di eccitazione si concatena con il circuito secondario e pertanto si avrà una forza elettromotrice indotta in fase oppure in opposizione con la tensione di linea. Se ora immaginiamo di far ruotare il rotore stesso mediante una ruota elicoidale fissata sul suo albero otterremo un certo valore angolare tra l'asse dell'avvolgimento statorico e quello del circuito rotorico. Avremo quindi una risultante vettoriale fra la tensione inducente e quella indotta, il cui valore diventerà più piccolo con l'aumentare dell'angolo fra i due assi

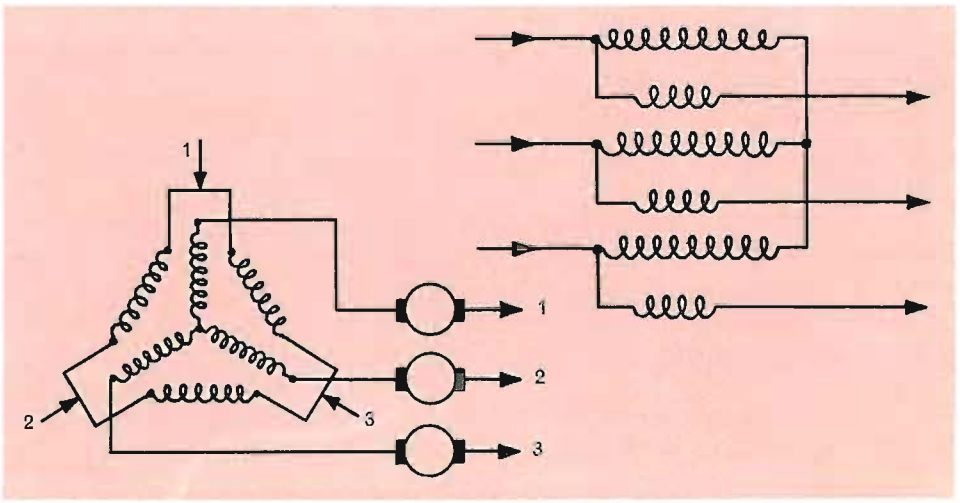


Fig. 44 - Regolatore ad induzione (sfasatore, variatore di tensione).

dei rispettivi avvolgimenti e potrà raggiungere il valore zero quando fra i due assi esisterà uno sfasamento di circa 90°, naturalmente nella ipotesi che la macchina sia a due poli. In queste condizioni nell'avvolgimento secondario non avremo più flusso concatenato e quindi non vi sarà più mutua induzione fra i due avvolgimenti.

In queste condizioni il regolatore si comporta come una impedenza in serie con la linea; questa impedenza rende sensibile la tensione secondaria con il variare del carico; per evitare questo inconveniente si usa interporre nel regolatore un avvolgimento di compensazione detto anche avvolgimento terziario chiuso in corto circuito su se stesso, in modo da ridurre la reattanza secondaria: il flusso prodotto da questo circuito indurrà nel circuito secondario una forza elettromotrice capace di opporsi alla forza elettromotrice di autoinduzione.

Con questo accorgimento il circuito primario assorbirà soltanto la corrente di eccitazione della macchina. Se noi continuiamo a ruotare la parte mobile fino a raggiungere un angolo relativo di 90°, avremo sul secondario un valore di induzione ancora massimo, però questa volta di segno opposto.

Chiamata quindi con V la tensione di linea e con E la forza elettromotrice indotta, noi potremo ottenere sul circuito secondario una tensione pari al valore di $V + E$ oppure pari al valore di $V - E$. Di conseguenza, se il valore E della forza elettromotrice è eguale a V, potremo, con la rotazione di questa parte mobile del regolatore di induzione, variare la tensione del circuito secondario da 0 a due volte la tensione di linea.

Questo tipo di variatore di tensione è molto usato nei laboratori e nelle prove anche se il suo rendimento è ovviamente alquanto inferiore a quello dell'equivalente autotrasformatore a prese multiple visto nel primo libro. Inoltre notevole è la sua praticità perchè è possibile variare la tensione secondaria con molta precisione e gradualità senza dover ricorrere all'ausilio di contatti striscianti di dubbia sicurezza di funzionamento soprattutto se vengono usati con molta frequenza.

■ Accoppiamento in parallelo delle dinamo

Si è ritenuto opportuno trattare, sia pure brevemente, questo problema in quanto tocca allo stesso utente (che ha a disposizione queste macchine) eseguire operazioni del genere senza l'ausilio del tècnico elettricista. Si prenda in proposito in esame lo schema di fig. 45. Le manovre da eseguire sono le seguenti:

a) avviare la dinamo agendo sul motore ad essa accoppiato dopo avere chiuso l'interruttore di linea;

b) regolare la tensione agendo sull'apposito reostato in modo che la dinamo generi la tensione di linea desiderata;

c) avviare il secondo motore, la cui dinamo si desidera mettere in parallelo con la prima già in servizio; si regoli la eccitazione della seconda dinamo allo scopo di ottenere una identica tensione;

d) chiudere l'interruttore della dinamo sulla rete dei servizi di alimentazione; se le due dinamo sono di eguale potenza le due correnti erogate, lette rispettivamente in uscita alle due dinamo, devono essere eguali; se ciò non fosse, regolare la tensione di una delle due dinamo in modo che le correnti rispettive siano proporzionali alle potenze delle macchine messe in parallelo.

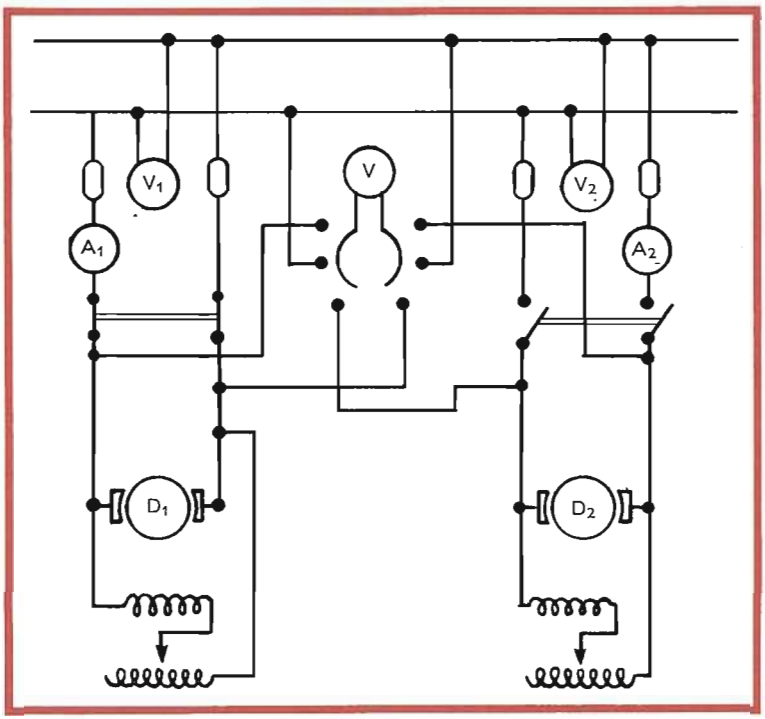


Fig. 45 - Parallelo di due dinamo.

Tabella dei simboli

Segno grafico	Tipo di strumento	Tipo di correnti	Segno grafico	Tipo di strumento	Tipo di correnti
	Magnetoelettrico (magnete fisso, bobina mobile).			Magnetoelettrico con termocoppia isolata.	
	Elettromagnetico (bobina fissa, ferro mobile).			Termocoppia.	
	Elettrodinamico.			Termocoppia isolata.	
	Elettrodinamico con ferro.			Raddrizzatore.	
	A induzione.			Strumento da usare con quadrante verticale.	
	Termico a filo caldo.			Idem da usare con quadrante orizzontale.	
	Termico a lamina bimetallica.			Idem da usare con quadrante inclinato.	
	Elettrostatico.			Tensione di prova 500 V.	
	Magnetoelettrico con raddrizzatore.			Tensione di prova 2000 V.	
	Magnetoelettrico con termocoppia.			Dispositivo di regolazione dello zero.	
				Trifase a tre fili equilibrato.	
	Trifase non equilibrato.			Idem a 4 fili non equilibrato.	

Tav. 1 Principali misure inglesi e loro equivalenza nel sistema metrico decimale

Lunghezza			
1 inch (in), o *pollice*		cm	2,5400
1 foot (ft), o *piede*	(= 12 pollici)	m	0,3048
1 yard (yd)	(= 3 piedi)	m	0,9144
1 pole, o perch, o rod	(= 5,5 yards)	m	5,0292
1 furlong	(= 220 yards)	km	0,2012
1 statute mile	(= 1760 yards = 5280 piedi)	km	1,6093
1 nautical mile	(= 6080 piedi)	km	1,8532
1 admiralty mile	(= 6086,5 piedi)	km	1,8552
Superficie			
1 square inch (sq. in), o *pollice*^{2}		cm^2	6,4516
1 square foot (sq. ft), o *piede*^{2}	(= 144 pollici^2)	m^2	0,0929
1 square yard (sq. yd), o *yard*^{2}	(= 9 piedi^2)	m^2	0,8361
1 acre, o *acro*	(= 4840 yards^2)	hm^2	0,4047
1 square mile, o *miglio*^{2}	(= 640 acri)	km^2	2,5900
Volume			
1 cubic inch (cu. in), o *pollice*^{3}		cm^3	16,3870
1 cubic foot (cu. ft), o *piede*^{3}	(= 1728 pollici^3)	m^3	0,0283
1 cubic yard (cu. yd), o *yard*^{3}	(= 27 piedi^3)	m^3	0,7646
1 ocean ton	(= 40 piedi^3)	m^3	1,1327
1 register ton, o *tonnellata di registro* (cubatura o stazza delle navi)	(= 100 piedi^3)	m^3	2,832
Capacità			
1 gill		l	0,1421
1 pint (pt)	(= 4 gills)	l	0,5682
1 quart (qt)	(= 2 pints)	l	1,1365
1 Imperial gallon (gall)	(= 4 quarts)	l	4,5460
1 peck	(= 2 gallons)	l	9,0919
1 bushel (bsh)	(= 4 pecks = 8 gallons)	hl	0,3637
1 barrel (brl)	(= 36 gallons)	hl	1,6365
1 quarter (Qr)	(= 8 bushels = 64 gallons)	hl	2,9094
Peso: sistema avoir du poids (a.d.p.)			
1 dram (dr), o *dramma*		g	1,7718
1 ounce (oz), od *oncia*	(= 16 dramme)	g	28,3495
1 pound (lb), o *libbra*	(= 16 once)	kg	0,4536
1 stone	(= 14 libbre)	kg	6,3503
1 quarter	(= 2 stones = 28 libbre)	kg	12,701
1 hundredweight (cwt)	(= 4 quarters = 112 libbre)	q	0,5080
1 long ton	(= 20 hundredweights = 2240 libbre)	t	1,0160
Peso: sistema troy			
1 grain (gr), o *grano*		g	0,0648
1 pennyweight (dwt), o *denaro*	(= 24 grani)	g	1,5552
1 ounce (ozt), od *oncia*	(= 20 denari)	g	31,1035
1 pound (lbt), o *libbra*	(= 12 once)	kg	0,3732

Le tavole 1-2-3-4 sono state ricavate dal volume: L. Brasca - E. Levi: «Tavole numeriche». Ghisetti & Corvi Editori, Milano.

Tav. 2 Quadrati, cubi, radici quadrate e cubiche

1 100

n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	n	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$
1	1	1	1,0000	1,0000	**51**	26 01	132 651	7,1414	3,7084
2	4	8	4142	2599	**52**	27 04	140 608	2111	7325
3	9	27	1,7321	4422	**53**	28 09	148 877	2801	7563
4	16	64	2,0000	5874	**54**	29 16	157 464	3485	7798
5	25	125	2361	7100	**55**	30 25	166 375	4162	8030
6	36	216	2,4495	1,8171	**56**	31 36	175 616	7,4833	3,8259
7	49	343	6458	1,9129	**57**	32 49	185 193	5498	8485
8	64	512	2,8284	2,0000	**58**	33 64	195 112	6158	8709
9	81	729	3,0000	0801	**59**	34 81	205 379	6811	8930
10	100	1 000	1623	1544	**60**	36 00	216 000	7460	9149
11	1 21	1 331	3,3166	2,2240	**61**	37 21	226 981	7,8102	3,9365
12	1 44	1 728	4641	2894	**62**	38 44	238 328	8740	9579
13	1 69	2 197	6056	3513	**63**	39 69	250 047	7,9373	3,9791
14	1 96	2 744	7417	4101	**64**	40 96	262 144	8,0000	4,0000
15	2 25	3 375	3,8730	4662	**65**	42 25	274 625	0623	0207
16	2 56	4 096	4,0000	2,5198	**66**	43 56	287 496	8,1240	4,0412
17	2 89	4 913	1231	5713	**67**	44 89	300 763	1854	0615
18	3 24	5 832	2426	6207	**68**	46 24	314 432	2462	0817
19	3 61	6 859	3589	6684	**69**	47 61	328 509	3066	1016
20	4 00	8 000	4721	7144	**70**	49 00	343 000	3666	1213
21	4 41	9 261	4,5826	2,7589	**71**	50 41	357 911	8,4261	4,1408
22	4 84	10 648	6904	8020	**72**	51 84	373 248	4853	1602
23	5 29	12 167	7958	8439	**73**	53 29	389 017	5440	1793
24	5 76	13 824	4,8990	8845	**74**	54 76	405 224	6023	1983
25	6 25	15 625	5,0000	9240	**75**	56 25	421 875	6603	2172
26	6 76	17 576	5,0990	2,9625	**76**	57 76	438 976	8,7178	4,2358
27	7 29	19 683	1962	3,0000	**77**	59 29	456 533	7750	2543
28	7 84	21 952	2915	0366	**78**	60 84	474 552	8318	2727
29	8 41	24 389	3852	0723	**79**	62 41	493 039	8882	2908
30	9 00	27 000	4772	1072	**80**	64 00	512 000	8,9443	3089
31	9 61	29 791	5,5678	3,1414	**81**	65 61	531 441	9,0000	4,3267
32	10 24	32 768	6569	1748	**82**	67 24	551 368	0554	3445
33	10 89	35 937	7446	2075	**83**	68 89	571 787	1104	3621
34	11 56	39 304	8310	2396	**84**	70 56	592 704	1652	3795
35	12 25	42 875	5,9161	2711	**85**	72 25	614 125	2195	3968
36	12 96	46 656	6,0000	3,3019	**86**	73 96	636 056	9,2736	4,4140
37	13 69	50 653	0828	3322	**87**	75 69	658 503	3274	4310
38	14 44	54 872	1644	3620	**88**	77 44	681 472	3808	4480
39	15 21	59 319	2450	3912	**89**	79 21	704 969	4340	4647
40	16 00	64 000	3246	4200	**90**	81 00	729 000	4868	4814
41	16 81	68 921	6,4031	3,4482	**91**	82 81	753 571	9,5394	4,4979
42	17 64	74 088	4807	4760	**92**	84 64	778 688	5917	5144
43	18 49	79 507	5574	5034	**93**	86 49	804 357	6437	5307
44	19 36	85 184	6332	5303	**94**	88 36	830 584	6954	5468
45	20 25	91 125	7082	5569	**95**	90 25	857 375	7468	5629
46	21 16	97 336	6,7823	3,5830	**96**	92 16	884 736	9,7980	4,5789
47	22 09	103 823	8557	6088	**97**	94 09	912 673	8489	5947
48	23 04	110 592	6,9282	6342	**98**	96 04	941 192	8995	6104
49	24 01	117 649	7,0000	6593	**99**	98 01	970 299	9,9499	6261
50	25 00	125 000	0711	6840	**100**	1 00 00	1 000 000	10,0000	6416

Tav. 3 Valori di alcune costanti

$\pi = 3{,}141\ 593$	$\frac{\pi}{2} = 1{,}570\ 796$		$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707\ 107$
$2\pi = 6{,}283\ 185$	$\frac{\pi}{4} = 0{,}785\ 398$	$\sqrt{2} = 1{,}414\ 214$	$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866\ 025$
$4\pi = 12{,}566\ 371$	$\frac{1}{\pi} = 0{,}318\ 310$	$\sqrt{3} = 1{,}732\ 051$	
$\frac{4}{3}\pi = 4{,}188\ 790$	$\frac{1}{2\pi} = 0{,}159\ 155$		$\frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 0{,}577\ 350$

Tav. 4 Terne pitagoriche

Cateti	3	5	8	7	20	12	9	28	11	16	33	48	36	13	39
	4	12	15	24	21	35	40	45	60	63	56	55	77	84	80
Ipotenusa	5	13	17	25	29	37	41	53	61	65	65	73	85	85	89

Altre terne si ottengono ovviamente moltiplicando per un fattore costante. Sono indicate tutte le terne, irriducibili, con numeri minori di 100.

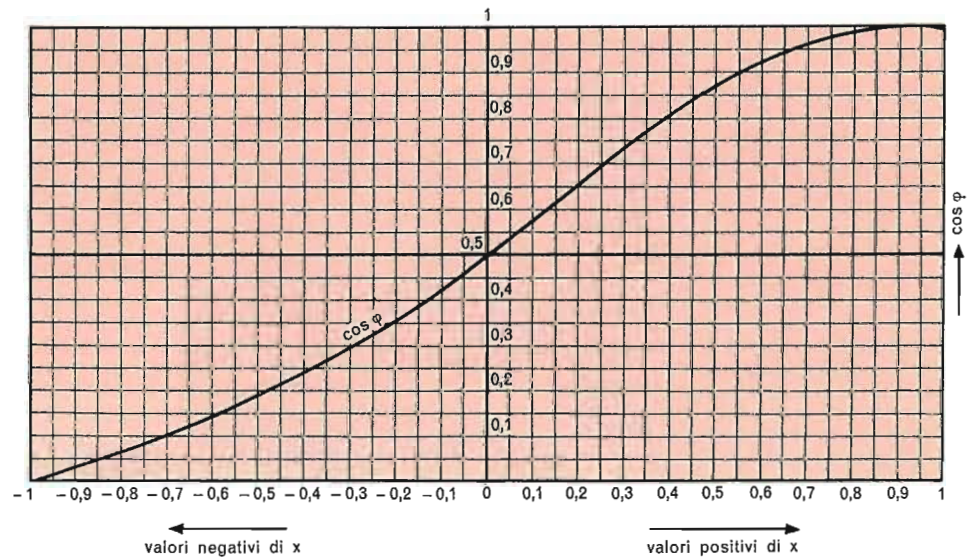


Diagramma per il rilievo del fattore di potenza mediante la lettura di due wattmetri collegati ad una rete trifase simmetrica ed equilibrata (sistema aron).

Tav. 5 Funzioni trigonometriche di archi speciali

arco	sen	cos	tang	cotg
0°	0	1	0	∞
9°	$\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}-\sqrt{5-\sqrt{5}}}{4}$	$\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}+\sqrt{5-\sqrt{5}}}{4}$	$\frac{4-\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{\sqrt{5}-1}$	$\frac{\sqrt{5}-1}{4-\sqrt{10+2\sqrt{5}}}$
15°	$\frac{1}{4}(\sqrt{6}-\sqrt{2})$	$\frac{1}{4}(\sqrt{6}+\sqrt{2})$	$2-\sqrt{3}$	$2+\sqrt{3}$
18°	$\frac{1}{4}(\sqrt{5}-1)$	$\frac{1}{4}\sqrt{10+2\sqrt{5}}$	$\frac{1}{5}\sqrt{25-10\sqrt{5}}$	$\sqrt{5+2\sqrt{5}}$
30°	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}=\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\sqrt{3}$
36°	$\frac{1}{4}\sqrt{10-2\sqrt{5}}$	$\frac{1}{4}(\sqrt{5}+1)$	$\sqrt{5-2\sqrt{5}}$	$\frac{1}{5}\sqrt{25+10\sqrt{5}}$
45°	$\frac{\sqrt{2}}{2}=\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}=\frac{1}{\sqrt{2}}$	1	1
54°	$\frac{1}{4}(\sqrt{5}+1)$	$\frac{1}{4}\sqrt{10-2\sqrt{5}}$	$\frac{1}{5}\sqrt{25+10\sqrt{5}}$	$\sqrt{5-2\sqrt{5}}$
60°	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\sqrt{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}=\frac{\sqrt{3}}{3}$
72°	$\frac{1}{4}\sqrt{10+2\sqrt{5}}$	$\frac{1}{4}(\sqrt{5}-1)$	$\sqrt{5+2\sqrt{5}}$	$\frac{1}{5}\sqrt{25-10\sqrt{5}}$
75°	$\frac{1}{4}(\sqrt{6}+\sqrt{2})$	$\frac{1}{4}(\sqrt{6}-\sqrt{2})$	$2+\sqrt{3}$	$2-\sqrt{3}$
81°	$\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}+\sqrt{5-\sqrt{5}}}{4}$	$\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}-\sqrt{5-\sqrt{5}}}{4}$	$\frac{\sqrt{5}-1}{4-\sqrt{10+2\sqrt{5}}}$	$\frac{4-\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{\sqrt{5}-1}$
90°	1	0	∞	0

La tavola 5 è stata ricavata dal volume: L. Brasca - E. Levi: «Logaritmi». Ghisetti & Corvi Editori, Milano.

CAPITOLO III

ESERCIZI DI APPLICAZIONE

Esercizio 1

Regolazione della tensione con reostato in parallelo

Questo metodo viene usato ogniqualvolta si desideri avere una differenza di potenziale (generalmente a c.c.) abbastanza costante e minore di quella fornita dalla sorgente di cui si dispone (dinamo-batteria di accumulatori).

Lo schema relativo è rappresentato dalla fig. 1.

Questo sistema viene usato vantaggiosamente quando la corrente assorbita dall'utilizzatore è modesta rispetto alla tensione richiesta.

Gli apparecchi usati a titolo di esempio sono (*l'allievo deve abituarsi fin dalla prima esercitazione ad indicare con precisione tutte le caratteristiche delle apparecchiature usate*):

Strumentazione

Accumulatori: «Tudor Alcalini»;
Tipo 5/5C5 4 Volt 6;
Capacità: Ah 10 in 5 h;
Corrente di scarica: normale 2 A - massima 8 A;
Corrente di carica: normale 2 A - massima 4 A;
Durata della carica a corrente normale: 7 h;
Data fabbricazione: 3/61;
Matricola: N. 3744/3.

Interruttore: «Ticino» I 5-25;
Volt 380;
Art. 1603.

Reostato: «Hocastbelastung»
0,3/0,45 A - 4200 Ohm. N. 60726.

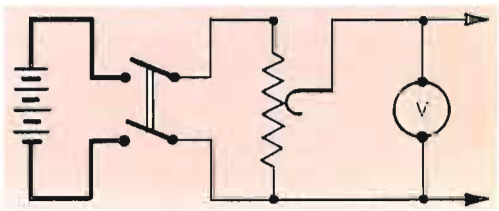


Fig. 1 - Regolazione della tensione con reostato in parallelo.

Voltmetro: «Precision» Milano - 1000 Ω/V; N. 210532; Mod. GG.

Le letture eseguite figurano riportate nella tabella che segue:

Reostato		Voltmetro		
α	α R	δ	Kv	V
—	Ω	div.	V/div.	V
0	0	0	1	0
0,1	420	0,4		0,4
0,2	840	0,8		0,8
0,3	1260	1,1		1,1
0,4	1680	1,6		1,6
0,5	2100	2,4		2,4
0,6	2520	3,1		3,1
0,7	2940	3,85		3,85
0,8	3360	4,70		4,70
0,9	3780	5,65		5,65
1	4200	6,6		6,6

Dove con α si è chiamata la posizione del reostato e con δ la deviazione dell'ago del voltmetro.

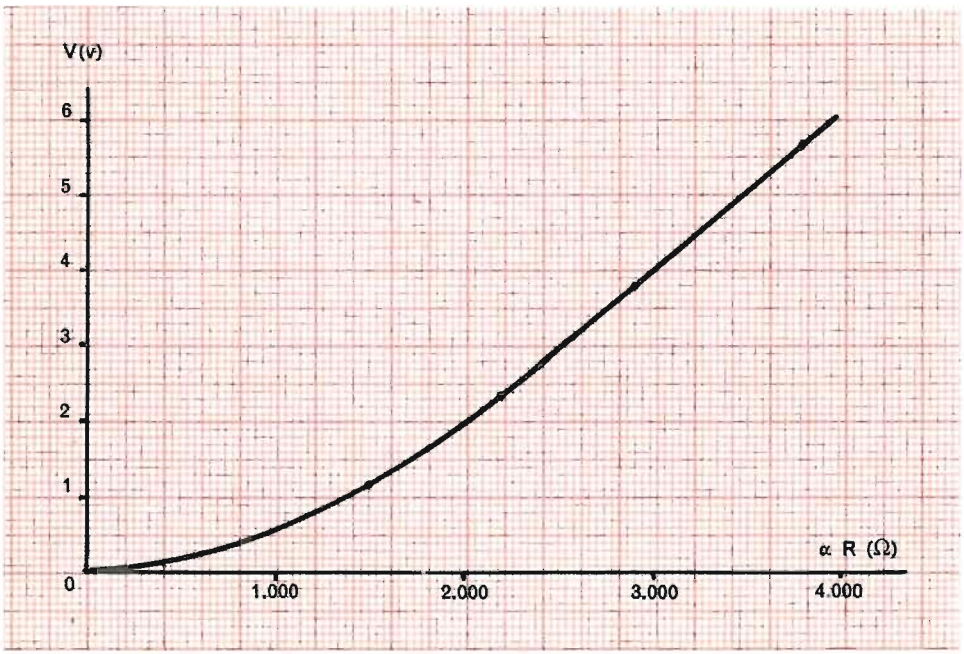


Fig. 2 - Diagramma tensione-resistenza.

I valori ricavati possono essere facilmente posti in diagramma (fig. 2).

Preso nota delle caratteristiche degli strumenti e del circuito elettrico dividiamo empiricamente il reostato in 10 parti eguali per avere così vari valori, anche se imprecisi, della resistenza. Spostando il cursore del reostato leggiamo su un voltmetro, in parallelo con la resistenza variabile, la tensione. Portiamo ora in grafico i valori ottenuti e precisamente r in ascisse e V in ordinate. Notiamo che il coefficiente angolare della retta trovata coincide con la corrente I. Per l'imprecisione della misura di r l'andamento non risulta rettilineo.

Esercizio 2

Regolazione della corrente con reostato in serie

Questo metodo viene usato ogniqualvolta occorra ridurre il valore della corrente assorbita dall'utilizzatore. La disposizione della resistenza in serie è possibile sia per circuiti in c.a. che in c.c. ed è valida particolarmente quando la corrente assorbita dal carico è relativamente grande rispetto alla tensione richiesta.

Lo schema dei collegamenti è in fig. 3.

Strumentazione

Batteria: BT3.
Voltmetro: VC 26.
Reostato: 507181;
Tipo R8SP - 20 Ω 5 A.
Milliamperometro: AC1.
Voltmetro: VC 27.
Bipolo: min 18.

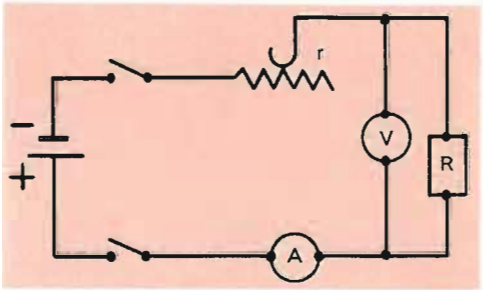


Fig. 3 - Regolazione della corrente con reostato in serie.

V batteria	I	V	αr
6,10	0,178	1,94	20
6,10	0,180	2,10	18
6,10	0,187	2,15	16
6,10	0,209	2,25	14
6,10	0,220	2,39	12
6,10	0,238	2,55	10
6,10	0,260	2,80	8
6,10	0,289	3,11	6
6,10	0,332	3,60	4
6,10	0,400	4,35	2
6,10	0,500	5,50	0

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5,5}{0,5} = 11\ \Omega, \qquad R_t = 11\ \Omega,$$

$$R = \frac{4,35}{0,4} = 10,87\ \Omega, \qquad R_t = 10,87 + 2 = 12,87\ \Omega,$$

$$R = \frac{3,6}{0,332} = 10,8\ \Omega, \qquad R_t = 10,8 + 4 = 14,8\ \Omega,$$

$$R = \frac{3,11}{0,289} = 10,8\ \Omega, \qquad R_t = 10,8 + 6 = 16,8\ \Omega,$$

$$R = \frac{2,80}{0,26} = 10,77\ \Omega, \qquad R_t = 10,77 + 8 = 18,77\ \Omega,$$

$$R = \frac{2,55}{0,238} = 10,7\ \Omega, \qquad R_t = 10,7 + 10 = 20,7\ \Omega,$$

$$R = \frac{2,39}{0,22} = 10,8\ \Omega, \qquad R_t = 10,8 + 12 = 22,8\ \Omega,$$

$$R = \frac{2,25}{0,209} = 10,79\ \Omega, \qquad R_t = 10,79 + 14 = 24,79\ \Omega,$$

$$R = \frac{2,15}{0,187} = 11,5\ \Omega, \qquad R_t = 11,5 + 16 = 27,5\ \Omega,$$

$$R = \frac{2,1}{0,180} = 11,6\ \Omega, \qquad R_t = 11,6 + 18 = 29,6\ \Omega,$$

$$R = \frac{1,94}{0,178} = 10,9\ \Omega, \qquad R_t = 10,9 + 20 = 30,9\ \Omega.$$

I valori trovati vengono posti nel diagramma di fig. 4, a pag. 63.

Esercizio 3

Caratteristica tensione-corrente di un bipolo normale

Spesso si richiede di conoscere il valore della corrente che transita attraverso un utilizzatore in funzione della tensione applicata (fig. 5).

Questa analisi può spesso portare in inganno quando si trascura il valore della corrente assorbita dal voltmetro.

Perciò si deve sempre confrontare il valore della resistenza interna del voltmetro rispetto a quella dell'utilizzatore per vedere se è lecito trascu-

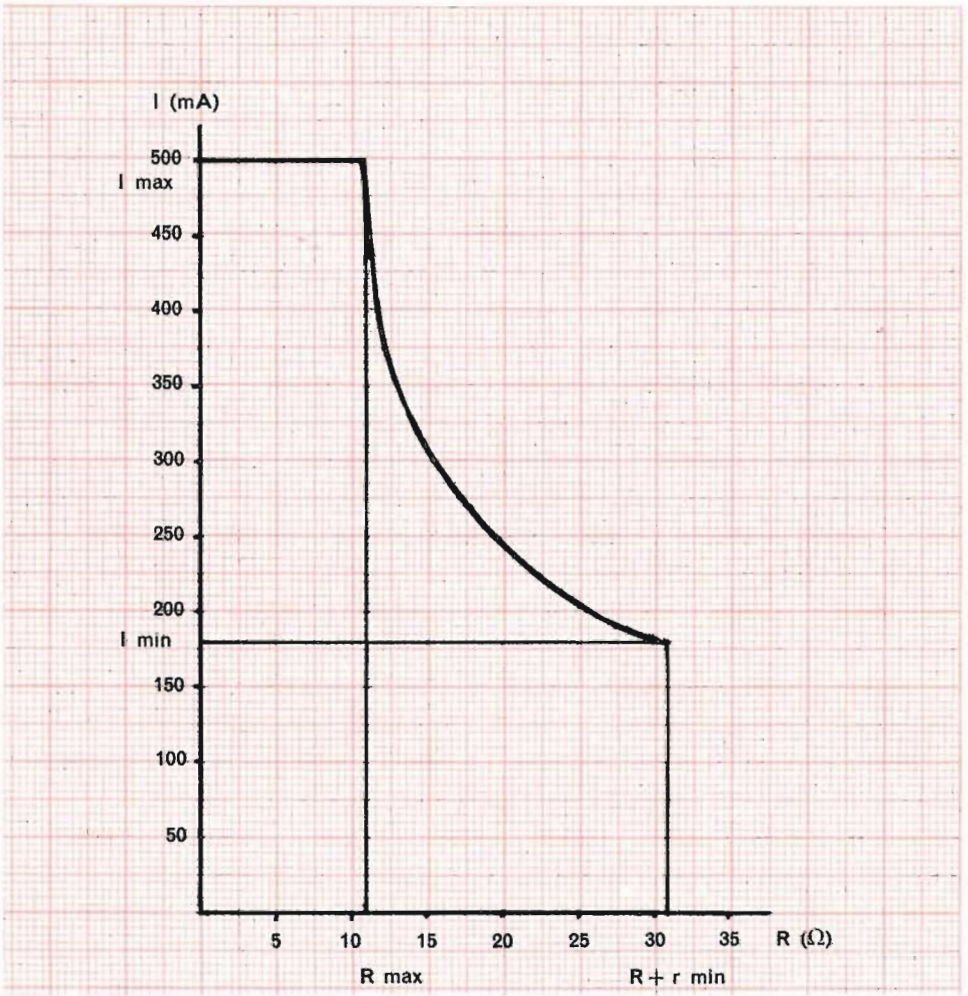


Fig. 4 - Diagramma corrente-resistenza (es. 2).

rare l'autoconsumo del voltmetro oppure se si debba tenerne conto.

Lo scopo della presente esercitazione è di rilevare la caratteristica tensione-corrente di un dipolo normale e di notare se esso si comporti come una resistenza per cui valga la legge di Ohm $\frac{V}{I} = R = \text{cost.}$

L'esercitazione si esegue nel seguente modo: chiuso l'interruttore T, si regola la tensione con una manopola posta a monte dell'interruttore, si esegue una serie di 10 letture e si riportano i valori trovati prima in tabella quindi si traccia un diagramma in modo da ottenere una retta partente dall'origine.

Strumentazione

Voltmetro: «Precision» Milano:

Mod. 66;

N. 210538 - 1000 Ω/V;

Tipo a magnete permenente;

Classe di precisione 1,5;

Da usarsi verticale o con una inclinazione max di 30°;

Numero di laboratorio: VC 18.

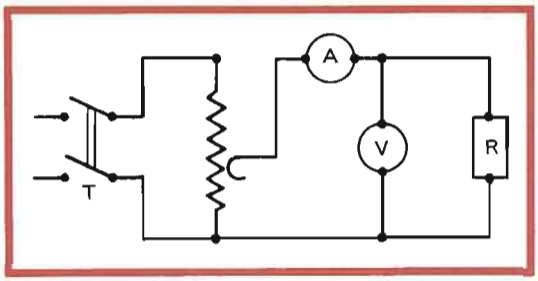


Fig. 5 - Circuito per la rilevazione della caratteristica di un bipolo normale tensione-corrente.

Amperometro: «Precision» Milano;

Mod. SGQ;

N. 42199 - 5 mA - 100 mV;

Tipo a magnete permanente;

Classe di precisione 1;

Da usarsi verticale o con un'inclinazione max di 30°;

Numero di laboratorio: AC 5.

I valori ricavati risultano indicati dalla tabella che segue:

N.	I			V		
	δ div.	Ka A/div.	A mA	δ div.	Kv V/div.	V Volt
1	3	20	60	4	5	20
2	6	↓	120	8	↓	40
3	8,5		170	12		60
4	11,5		230	15,3		75
5	14		280	19		95
6	17		340	23		115
7	20		400	27		135
8	23		460	31		155
9	26		520	35		175
10	29	↓	580	39	↓	195

I valori ottenuti vengono posti nel diagramma di fig. 6.

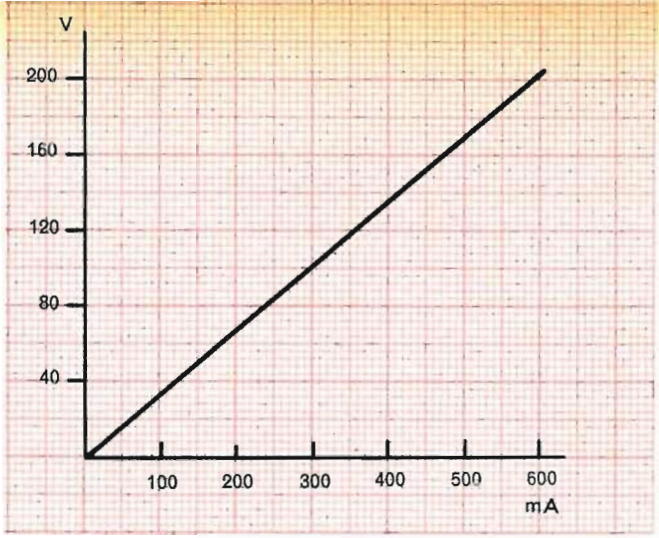


Fig. 6 - Diagramma tensione-corrente.

Esercizio 4

Caratteristica tensione-corrente di un bipolo anomalo

Si intende per bipolo anomalo quel tipo di utilizzatore la cui caratteristica corrente/tensione può bruscamente variare per effetto di un determinato incremento del potenziale applicato oppure per la variazione del senso della corrente (cambio di polarità) come ad esempio può accadere in un circuito il cui carico sia costituito da un raddrizzatore statico.

Strumentazione

Voltmetro: «Precision» Milano;
Mod. 66;
N. 210532 - 1000 Ohm/V.

Amperometro: M.S.G.Q.
N. 42196 - 5 mA - 100 mV.

Reostato:
Tipo 406/S;
N. 14067 - 100 Ohm - 2,5 A.

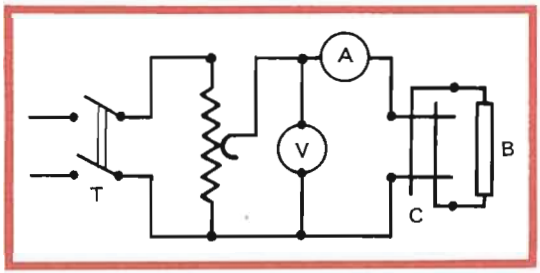


Fig. 7 - Circuito per la rilevazione delle caratteristiche tensione-corrente di un bipolo anomalo.

Scopo della presente esercitazione è di notare la caratteristica tensione-corrente di un bipolo anomalo. Dato che si deve poter dare tensioni sia positive che negative e dato che gli strumenti segnano solo tensioni positive invertiremo quando necessario le polarità del bipolo e di conseguenza il senso della corrente, invece di invertire le d.d.p.

Si varia la resistenza del reostato mediante il cursore e si varia la tensione di alimentazione (fig. 7).

Eseguendo le letture si ottengono valori che si riportano sul grafico di fig. 8.

Fig. 8 - Diagramma tensione-corrente di un bipolo anomalo.

Letture negative

N.	σ div.	K_A/div.	I(A)	σ div.	K_V/div.	V (Volt)
1	0,01	10	0,1	5	1	5
2	0,02	↓	0,2	10	↓	10
3	0,04		0,4	15		15
4	0,07		0,7	17,2		17,2

Letture positive

N.	σ div.	K_A/div.	I(A)	σ div.	K_V/div.	V (Volt)
1	4	10	40	2	1	2
2	9,4	↓	94	4	↓	4
3	12		120	5		5
4	14,9		149	6		6
5	20		200	8		8
6	25,5		225	10		10
7	32		320	12		12
8	36,5		365	14		14
9	39,6		396	15		15
10	42		420	16		16

Esercizio 5

Determinazione del valore di una resistenza col metodo del ponte di Wheatstone

Il metodo del ponte di Wheatstone è di grande importanza e di esteso impiego in molti circuiti più o meno complessi nei quali si voglia misurare o paragonare una entità rispetto ad una altra presa come campione.

Il principio generale su cui si basa il suo funzionamento è il seguente. Si abbiano quattro resistenze R_A, R_B, R_C, R_X poste fra di loro in serie come in fig. 9.

Su di una diagonale viene inserita una sorgente di f.e.m. e sull'altra un galvanometro a zero centrale. Il ponte sarà in equilibrio (il galvanometro segnerà zero) quando si verificherà la seguente condizione: $R_B \times R_C = R_A \times R_X$.

Pertanto sarà possibile, noto il valore di tre delle quattro resistenze formanti il circuito, conoscere il valore della quarta, R_X.

Questo metodo offre il notevole vantaggio di raggiungere l'equilibrio proprio quando il galvanometro è sullo zero cioè quando non esiste autoconsumo nello strumento indicatore.

Lo schema dei collegamenti è rappresentato dalla fig. 9.

R_A, R_B, R_C sono dei reostati.

Dallo schema del ponte di Wheatstone risulta che la resistenza incognita si determina tramite i prodotti in croce delle resistenze $R_A \times R_X = R_B \times R_C$, da cui

$$R_X = \frac{R_B}{R_A} R_C .$$

Per semplificare il calcolo si attribuiscono per mezzo delle cassette di resistenze, valori interi al rapporto $\frac{R_B}{R_A}$, in particolare valori che risultino potenze di 10.

Per determinare il valore di R_X, cioè della resistenza incognita, occorrerà determinare il valore della resistenza R_C, in modo che, a circuito chiuso, il galvanometro non segni passaggio di corrente.

Attribuendo al rapporto $\frac{R_B}{R_A}$ valori sempre inferiori si aumenta proporzionalmente la precisione con cui si determina R_C e quindi la resistenza incognita; ottenuti più valori di R_X se ne determina il valore medio.

Nell'esperienza descritta sono state impiegate due resistenze incognite: una del valore di 153,3 Ohm, l'altra di 1648,3 Ohm.

Per evitare che extracorrenti di apertura danneggino il galvanometro si apre sempre per primo il tasto t_2 del galvanometro e poi il tasto t_1 della batteria. Il ponte di Wheatstone serve per misurare resistenze da 1 Ω a 100.000 Ω. Sono in commercio ponti di Wheatstone portatili.

Strumentazione

Accumulatore: « Tudor Alcalini »;

Mod. 5/5CS4 - 6 Volt;
Capacità: A/h 10 in 5 h;
Corrente di scarica: normale 2 A - max 8 A;
Corrente di carica: normale 2 A - max 4 A;
Durata carica corrente normale: 7h;
Data di fabbricazione: 3-61;
Matricola: N. 3744/1;
Densità elettrolita: 1,2;
Livello elettrolita 5 mm al di sopra del bordo superiore delle piastre.

Resistenze: « Allocchio Bacchini & C. » Milano;

Mod. 1550;
N. 510142 - N. 510145 - N. 510154.

Galvanometro: « Allocchio Bacchini & C. » Milano;

Mod. G 37;
N. 71119;
2 ηA/divisione.

Reostato: « Seci » Milano;

N. 6525 - Ω 110;
Tipo 405/S - AZ.

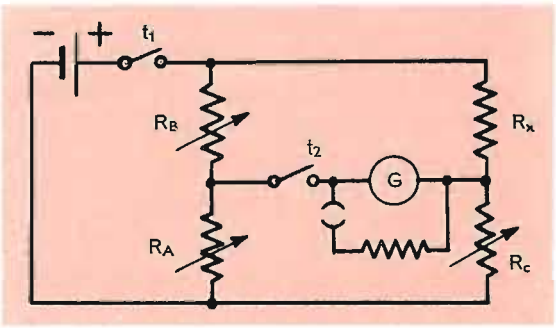


Fig. 9 - Circuito ponte Wheatstone.

	R_B/R_A	$R_c[\Omega]$	$R_x[\Omega]$	R_x medio
1	100/100	154	154	
2	100/1000	1539	153,9	153,3
3	10/1000	1520	152	

	R_B/R_A	$R_c[\Omega]$	$R_x[\Omega]$	R_x medio
1	100/100	1645	1645	
2	1000/100	165	1650	1648,3
3	100/10	165	1650	

Esercizio 6

Taratura di un amperometro classe 1÷1,5 con amperometro campione

Questo metodo è molto usato per la taratura di strumenti di serie di non elevata precisione; si basa sul confronto diretto con uno strumento che serve da campione.

La fig. 10 rappresenta lo schema dei collegamenti.

Si leggono contemporaneamente i valori dell'intensità di corrente indicati dall'amperometro campione e quelli dello strumento da tarare. Si calcola E_r errore relativo e $E\%$ errore percentuale.

Dalla tabella che segue si vede che lo strumento in realtà aveva un errore superiore alla corrispondente classe di appartenenza.

N.	Amperometro campione			Amperometro da tarare			$E_a = I_t - I_c$	$E\% = E_r \cdot 100$
	δ div.	K A/div.	I_c A	δ div.	K A/div.	I_t A		
1	0,998	1	0,988	1	1	1,0	+ 0,012	+ 1,214
2	0,898	1	0,898	0,9	1	0,9	+ 0,002	+ 0,222
3	0,805	1	0,805	0,8	1	0,8	— 0,005	— 0,621
4	0,712	1	0,712	0,7	1	0,7	— 0,012	— 1,685
5	0,614	1	0,614	0,6	1	0,6	— 0,014	— 2,280
6	0,520	1	0,520	0,5	1	0,5	— 0,020	— 3,846
7	0,421	1	0,421	0,4	1	0,4	— 0,021	— 4,988
8	0,322	1	0,322	0,3	1	0,3	— 0,022	— 6,832
9	0,264	1	0,264	0,24	1	0,24	— 0,024	— 9,09

Note: $E_r = \frac{E_a}{I_c} = \frac{I_t - I_c}{I_c}$

Per amperometri in c.a. la taratura si fa in c.a.

Strumentazione

Amperometro campione: « Precision » Milano;
Mod. AA 1;
N. 11851;
Tipo: a corrente alternata, a ferro mobile;
Classe: 0,5;
Portata: 1 A;
Tensione di prova: 500 V.

Amperometro da tarare: « Precision » Milano;
Mod. AC 6;
Tipo: verticale a corrente continua, a magnete fisso e bobina mobile;
Tensione di prova: 500 V;
Classe: 1;
Portata: 1 A.

Reostato: « Officine Galileo »;
Tipo R 8 SP - N. 507181;
Resistenza: 20 Ω;
Portata: 5 A.

Interruttore: « Leybold »;
Mod. MIN 53
Tipo L - N. 50445;

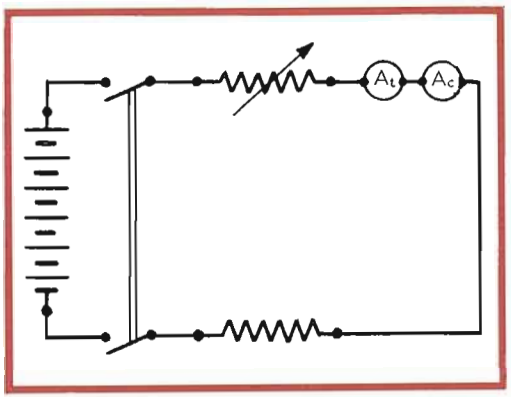


Fig. 10 - Schema collegamenti taratura amperometri.

Batteria: BT 1 « Tudor Alcalini »;
Tipo 5/5C - S4;
Tensione max: 6 V;
Capacità: 10 Ah in 5h;
Corrente di scarica: normale 2A - max 8A;
Corrente di carica: normale 2A - max 4A.

Esercizio 7

Taratura di un voltmetro con voltmetro campione

Metodo questo per eseguire rapidamente un confronto diretto fra uno strumento da tarare ed uno scelto come campione la cui scala è opportuno sia prossima od eguale a quella dello strumento da tarare.

Strumentazione

Voltmetro: « Precision » Milano;
N. 210534 (V_c 24);
Mod. GG;
$R_v = 1000\ \Omega/V$;

f.s. { 50 V cost. K = 1
20 V » K = 1
10 V » K = 1;

Classe: 0.5.

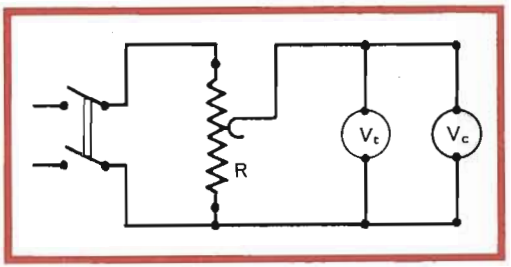


Fig. 11 - Schema collegamenti taratura voltmetri.

Voltmetro: « Precision » Milano;

N. 11860 (V_c V_c 7); Mod. P2M; $R_v = 1500\ \Omega/V$;

$$\text{f.s.} \begin{cases} 15\ V & \text{cost.} & K = 0{,}1 \\ 30\ V & \text{»} & K = 0{,}2 \\ 75\ V & \text{»} & K = 0{,}5; \end{cases}$$

Classe: 0.5.

Reostato: « Seci »; N. R10.1 - 1000 $\Omega \div$ 0,6A.

Mediante un reostato con inserzione potenziometrica facciamo circolare nel circuito una corrente della quale variamo la tensione.

Inseriti quindi nel circuito due voltmetri si procede alla taratura di uno strumento assumendo come campione quello di classe minore.

Possiamo pertanto variare il valore della tensione e calcolare le differenze fra i vari valori letti (vedi tabella). Potremo quindi calcolare l'errore assoluto che risulterà essere:

$$e = V - V_c;$$

e l'errore relativo percentuale:

$$\varepsilon\% = \frac{V - V_c}{V_c} \cdot 100;$$

mentre l'errore percentuale di f.s. risulterà essere:

$$\varepsilon\%_{fs} = \frac{V - V_c}{V_{fs}} \cdot 100.$$

Potremo pertanto tracciare i diagrammi relativi.

In generale per strumenti della classe 1,5 e 2,5 si adoperano voltmetri campioni della classe 0,5 e 1, per quelli delle classi 0,5 e 1 si adoperano voltmetri campioni classe 0,2; questi ultimi vengono tarati mediante metodi indiretti.

N.	Voltmetro da tarare			Voltmetro campione			Errori				Note
	V			V_c			$e = V - V_c$	$\varepsilon = \frac{V - V_c}{V_c}$	$\varepsilon\% = 100\,\varepsilon$	$\varepsilon_{fs}\% = \frac{V - V_c}{V_{fs}}\,100$	
	δ	k	V	δ	k	V_c	V	—	%	%	
1	1	1	1	10,2	1/10	1,02	—0,02	—0,0196	—1,96	—0,20	$V_{fs} = 10$ V $V_{c\,fs} = 15$ V
2	2		2	20,3		2,03	—0,03	—0,0147	—1,47	—0,30	
3	3		3	30,3		3,03	—0,03	—0,0099	—0,99	—0,30	
4	4		4	40,3		4,08	—0,08	—0,0196	—1,96	—0,80	
5	5		5	50,9		5,09	—0,09	—0,0178	—1,78	—0,90	
6	6		6	60,8		6,08	—0,08	—0,0131	—1,31	—0,30	
7	7		7	70,9		7,09	—0,09	—0,0126	—1,26	—0,90	
8	8		8	81,0		8,10	—0,10	—0,0123	—1,23	—1,00	
9	9		9	91,0		9,10	—0,10	—0,0109	—1,09	—1,00	
10	10	↓	10	102,2	↓	10,22	—0,22	—0,0215	—2,15	—2,20	
1	2	1	2	10,3	1/5	2,06	—0,06	—0,0291	—2,91	—0,30	$V_{fs} = 20$ V $V_{c\,fs} = 50$ V
2	4		4	20,6		4,12	—0,12	—0,0291	—2,91	—0,60	
3	6		6	31,1		6,22	—0,22	—0,0353	—3,53	—1,10	
4	8		8	41,0		8,20	—0,20	—0,0243	—2,43	—1,00	
5	10		10	50,9		10,18	—0,18	—0,0177	—1,77	—0,90	
6	12		12	60,8		12,16	—0,16	—0,0131	—1,31	—0,80	
7	14		14	70,8		14,16	—0,16	—0,0112	—1,12	—0,80	
8	16		16	80,9		16,18	—0,18	—0,0111	—1,11	—0,90	
9	18		18	91,1		18,22	—0,22	—0,0120	—1,20	—1,10	
10	20	↓	20	101,8	↓	20,36	—0,36	—0,1176	—1,76	—1,80	
1	5	1	5	10,6	1/2	5,30	—0,30	—0,0566	—5,66	—0,60	$V_{fs} = 50$ V $V_{c\,fs} = 75$ V
2	10		10	20,6		10,30	—0,30	—0,0291	—2,91	—0,60	
3	15		15	30,8		15,40	—0,40	—0,0259	—2,59	—0,90	
4	20		20	40,7		20,35	—0,35	—0,0172	—1,72	—0,70	
5	25		25	50,9		25,45	—0,45	—0,0176	—1,76	—0,90	
6	30		30	60,7		30,35	—0,35	—0,0115	—1,15	—0,70	
7	35		35	70,5		35,25	—0,25	—0,0070	—0,70	—0,50	
8	40		40	80,4		40,20	—0,20	—0,0049	—0,49	—0,40	
9	45		45	90,2		45,10	—0,10	—0,0022	—0,22	—0,20	
10	50	↓	50	101,6	↓	50,80	—0,80	—0,0157	—1,57	—1,60	

Esercizio 8

Taratura di un voltmetro come ohmmetro

Questo sistema riesce comodo in laboratorio quando si desideri disporre di uno strumento sicuro che dia direttamente il valore della resistenza di un circuito attraverso la caduta di tensione indicata dal voltmetro.

È opportuno rammentare che il dispositivo è valido qualora si disponga di una sorgente di f.e.m. sicura e costante.

Per realizzare questa taratura si dispone in serie al voltmetro una cassetta di resistenze a decadi. Si farà in modo che a resistenze escluse il voltmetro segni in f.s.

Poi gradatamente si inseriranno le resistenze e si leggerà il corrispondente valore sul voltmetro. Ottenuta la tabella si procederà poi alla esecuzione della curva.

Cassetta di resistenze:
RC 5 « Allocchio Bacchini & C. »;
Mod. 1561/I - N. 70827;
Tipo: a manopola a decadi.

Interruttore: « Leybold »;
Mod. MIN 53.

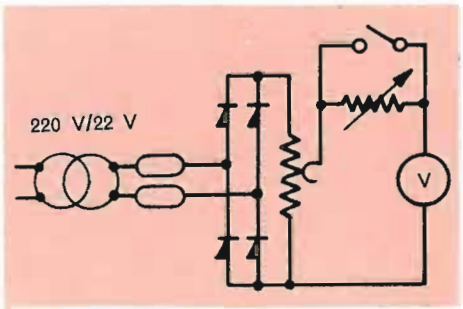


Fig. 12 - Schema collegamenti taratura voltmetro come ohmmetro.

Voltmetro: VC 20 « Precision » Milano;
Mod. GG - N. 210540;
Tipo: verticale a corrente continua, magnete fisso, bobina mobile;
Tensione di prova: 500 V - 1000 Ohm/V;
Classe: 1,5;
Portata: 20 V;
Divisioni: 20.

L'esperienza consiste essenzialmente nella misura di cadute di tensione (effettuata mediante voltmetro) provocate da resistenze campione.

A questo scopo si inserisce in un circuito potenziometrico una cassetta di resistenze variabili (a spina a decade) ed in serie ad essa un voltmetro.

La cassetta di resistenze può essere cortocircuitata, in modo che il voltmetro può essere portato in fondo scala senza incorrere in errori dovuti alle eventuali resistenze di contatto nell'interno della cassetta.

Premesso ciò, inserendo resistenze sempre crescenti, si misura per ciascuna di esse la corrispondente caduta di tensione.

Effettuato un certo numero di letture, saremo quindi in grado di tracciare il grafico della caduta di tensione in funzione della resistenza in-

serita, avremo cioè tarato il nostro voltmetro come ohmmetro, poichè misurata una qualunque caduta di tensione, con semplice interpolazione grafica (o analitica) potremo risalire al valore della resistenza che l'ha provocata (fig. 13).

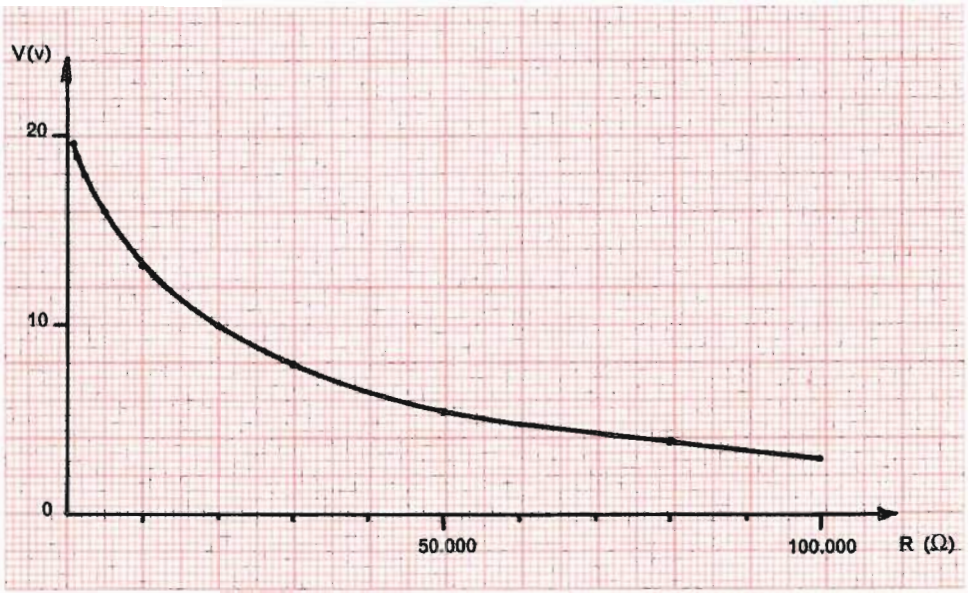


Fig. 13 - Diagramma tensione-resistenza.

Nota: Anche inserendo resistenze elevate, la caduta di tensione nell'interno della cassetta non eguaglia mai la tensione ad essa applicata; per ottenere ciò è necessario inserire una resistenza infinita, cioè interrompere in uno o più punti il circuito.

La tensione ai capi del generatore è di 22 V.

Il voltmetro con cassetta corto-circuitata segna 20 V in fondo scala.

Numero lettura N.	Voltmetro			Resistenza inserita nel circuito Ω
	divisioni δ	volt/div. k	tensione V	
1	19,5	1	19,5	500
2	19,1	1	19,1	1·000
3	18,3	1	18,3	2·000
4	16,1	1	16,1	5·000
5	13,4	1	13,4	10·000
6	10	1	10	20·000
7	8	1	8	30·000
8	5,7	1	5,7	50·000
9	4	1	4	80·000
10	3,3	1	3,3	100·000

Esercizio 9

Caratteristica esterna di un generatore (batterie di pile)

La caratteristica esterna o a carico di un generatore è data dalla curva che rappresenta la variazione della tensione ai morsetti del generatore al variare della corrente richiamata dall'utilizzatore.

Per esaminare nella forma più generale potremo pensare che il generatore sia un bipolo (fig. 14).

Ci si propone di determinare la caratteristica esterna di un generatore e di disegnare il grafico corrispondente.

Consideriamo il ns. generatore come un bipolo; in tale caso possiamo scrivere:

$P_1 = EI$ (potenza generata);

$P_2 = VI$ (potenza erogata);

$P_3 = RI^2$ (potenza perduta).

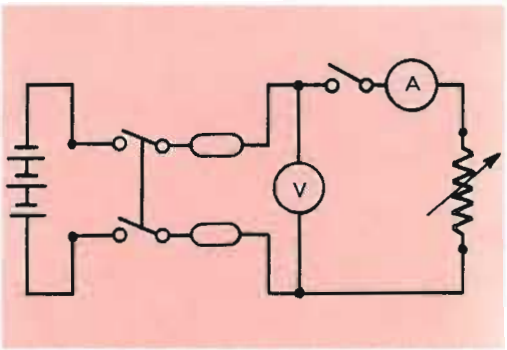


Fig. 14 - Schema di circuito per la ricerca della caratteristica esterna.

La legge di Ohm nel caso del generatore assume l'aspetto:

$$E - RI = V.$$

Variando il carico, cioè la potenza, si avrà una variazione della corrente.

Per verificare quanto prima affermato operiamo secondo il circuito raffigurato nello schema; a circuito aperto potremo determinare la E infatti:

$$V = E;$$

in quanto

$$RI = 0;$$

da cui

$$E - O = V.$$

Il generatore avrà quindi una f.e.m. costante uguale ad E.

Si chiude poi l'interruttore in modo da inserire il carico. Variando la resistenza del circuito, si leggeranno sugli appositi strumenti il valore della corrente e della tensione corrispondente.

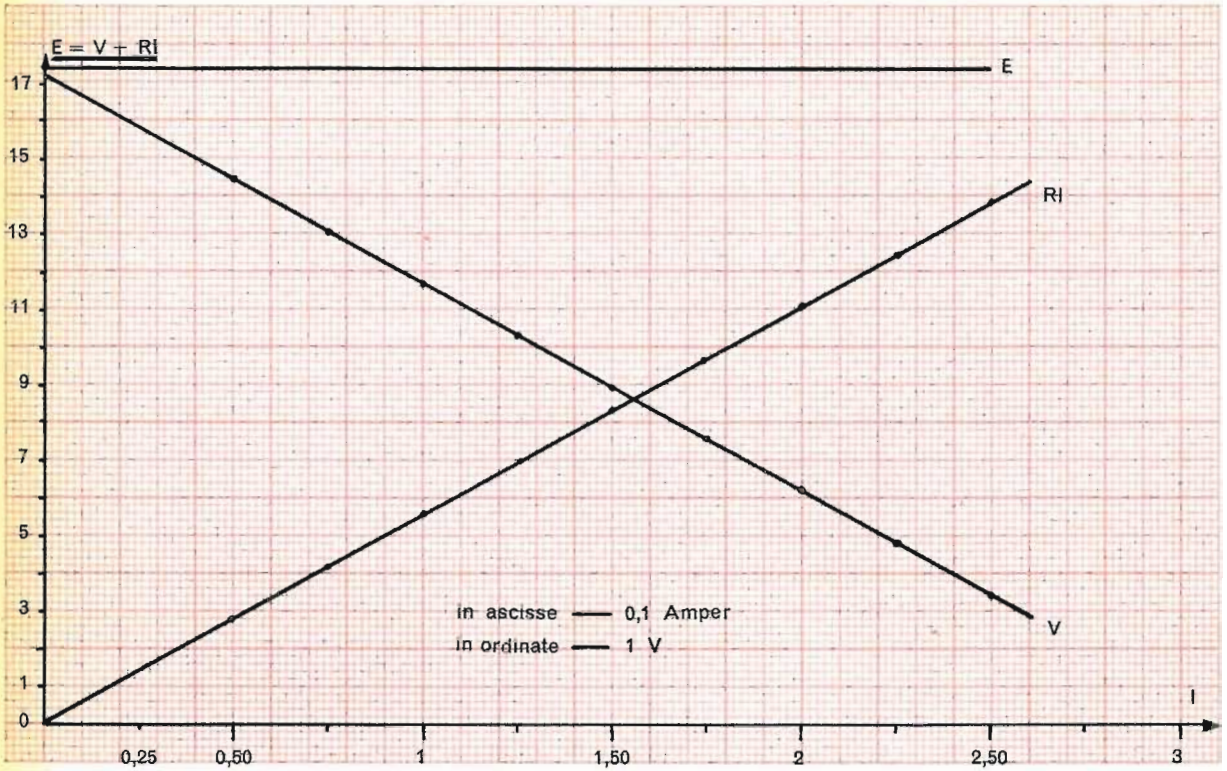


Fig. 15 - Diagramma di caratteristica esterna di un generatore.

Si può rappresentare graficamente in un diagramma quanto ottenuto sperimentalmente (fig. 15) e si ottiene:

$$E = 17{,}3.$$

N.	V			I		
	δ	k_v	V	δ	k_i	A
1	14,4	1	14,4	0,50	1	0,50
2	13,1		13,1	0,75		0,75
3	11,6		11,6	1,00		1,00
4	16,3		16,3	1,25		1,25
5	8,9		8,9	1,50		1,50
6	7,5		7,5	1,75		1,75
7	6		6	2,00		2,00
8	4,6		4,6	2,25		2,25
9	3,4		3,4	2,50		2,50
10	2		2	2,75		2,75
	1,2	↓	1,2	2,9	↓	2,9

Le cadute di tensione RI risultano da $E - V = RI$.

Esercizio 10

Misura della resistenza interna di un accumulatore

Con questo esercizio ci si propone di determinare la resistenza interna di un accumulatore, nel nostro caso una batteria « Tudor » tipo alcalino.

Strumentazione

Reostato: Ri1 N. 14065 - 100 Ω - A 2,5 - 406/S.
Amperometro: AC14 0,5 f.s. 0,5 A;
Tensione di prova: 500 V $K = 1/10 = 0{,}1$.
Galvanometro: 69 mod. 1506 - $R = 156\ \Omega$ - N. 680325; Amp./div. $4{,}6 \cdot 10^{-7}$ - 30 div.
Resistenza fissa: Rc12.
Reostato: R241 - 4200 Ω.
Alimentatore variabile: 2/522/35 A.
Accumulatore: « Tudor Alcalini »;
Mod. 5/5c/5 A - BI1 - 6 Volt;
Capacità: A/h 10 in 5 h;
Densità elettrolita: 1,2;
Corrente carica: normale 2 A, massima 8 A;
Corrente scarica: normale 2 A, massima 4 A.

Tenendo aperto il tasto (T) si fa circolare una corrente nel circuito, corrente che viene regolata mediante il reostato (R) (fig. 16).

Vi sarà così una forza elettromotrice fornita dal generatore che si opporrà a quella del circuito: si fa in modo di instaurare l'equilibrio; in tale caso il nostro generatore non avrà caduta di tensione perchè non eroga corrente.

Si può quindi scrivere che

$$E = RI.$$

Se ora si chiude il tasto si può leggere sull'amperometro un valore I': quindi avremo:

$$RI - E - rI' = V.$$

Da cui:

$$V = rI'.$$

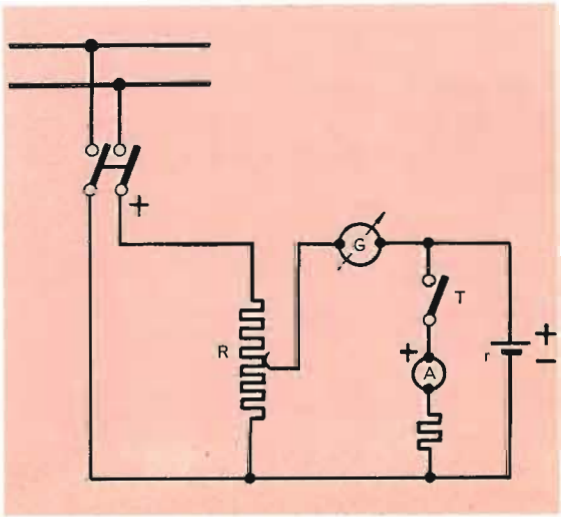


Fig. 16 - Collegamenti per la misura della resistenza interna di un accumulatore.

Le letture sono riportate nelle seguenti tabelle.

A circuito « aperto » (tasto T aperto) 10 letture per lo 0 più probabile.

N.	Sinistra (divis.)	Destra (divis.)
1	—	7
2	—	9
3	—	6,5
4	—	8
5	—	12
6	—	14
7	—	13,5
8	—	7
9	—	3
10	—	3

Facendo la media di questi valori ottenuti per lettura diretta delle divisioni del galvanometro si ottiene il valore:

$$\delta = 8{,}3.$$

A circuito « chiuso » (tasto T chiuso) leggiamo:

N.	Sinistra (divis.)	Destra (divis.)
1	16	—
2	23,5	—
3	24	—
4	24	—
5	23,5	—
6	14	—
7	30	—
8	30	—
9	27	—
10	30	—

$$I' = 0{,}198 \text{ Ampere.}$$

La media di questi altri valori ci fornisce il valore:

$$\delta = 24{,}2 \text{ divisioni.}$$

Lo spostamento totale dell'indice del galvanometro è quindi

$$\delta_o = 32{,}5 \text{ divisioni.}$$

Sappiamo però che ogni divisione della scala del galvanometro corrisponde a $4{,}6 \cdot 10^{-7}$ A e che la sua resistenza è di 156 Ohm.

Il valore della corrente segnalata dal galvanometro sarà quindi data dallo

$$\underset{\text{Amp./div.}}{4{,}6 \cdot 10^{-7}} \cdot \underset{\text{div.}}{32{,}5} = \underset{\text{Amp.}}{149{,}5 \cdot 10^{-7}}$$

e ricordando ancora

$$V = RI$$

$$V = 149{,}5 \cdot 10^{-7} \cdot 156 = 2{,}332 \text{ millivolt.}$$

Se ora dividiamo questo valore per quello dell'intensità di corrente letta sull'amperometro otteniamo il valore della resistenza.

Essa quindi vale:

$$\frac{0,002332}{0,198} = 0,011 \text{ Ohm.}$$

Pertanto la resistenza interna dell'accumulatore in esame è di 0,011 Ohm.

Esercizio 11

Misura di una capacità col metodo volt-amperometrico

Questo metodo usato nell'industria serve particolarmente per la misura della capacità di condensatori di medio e grande valore (fig. 17).

La capacità di un condensatore è il rapporto fra la carica ad esso fornita e il potenziale che di conseguenza esso assume

$$C = \frac{Q}{V},$$

o meglio, considerando rapporti infinitesimi di carica elettrica:

$$C = \frac{dq}{dv}.$$

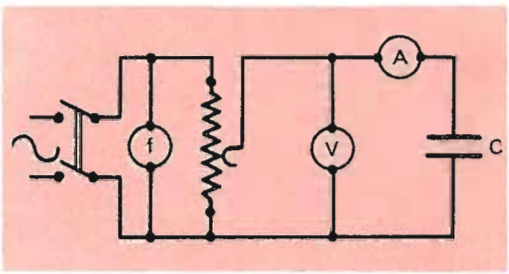


Fig. 17 - Schema di misura di capacità.

Da questa definizione si ricava:

$$dq = C\,dv$$

e derivando rispetto al tempo avremo:

$$\frac{dq}{dt} = i = \frac{dv}{dt}\,C. \qquad 1)$$

Se si applica ai capi di un condensatore una tensione variabile nel tempo si nota un passaggio di corrente misurabile con amperometri di tipo normale (elettromagnetici). In realtà non si ha passaggio di corrente attraverso il dielettrico, ma un susseguirsi rapidissimo di scariche e cariche di tipo elettrostatico attraverso il condensatore stesso. Quindi avremo dei valori della corrente istantanea sinusoidali e che risultano sfasati in anticipo di $\pi/2$ rispetto a quelli della tensione istantanea che li ha provocati. Infatti la tensione istantanea v è:

$v = V_M \text{ sen } \omega t$, in cui V_M è il valore massimo assunto dalla tensione.

La sua derivata rispetto al tempo sarà:

$$\frac{dv}{dt} = V_M \omega \cos \omega t$$

e quindi dalla 1):

$i = CV_M \omega \cos \omega t$, in cui, ovviamente, dovendo essere $\cos \omega t \leq 1$ (come noto dalla trigonometria) potremo scrivere:

$I_M = CV_M \omega$ dove I_M è la corrente massima di scarica del condensatore.

Quindi:

$$v = V_M \operatorname{sen} \omega t \qquad 2)$$

e anche:

$$i = I_M \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); \qquad 3)$$

c.v.d. la tensione è in ritardo di 90° sulla corrente.

Sostituiamo ora nella 2) e nella 3) rispettivamente i valori della tensione e della corrente efficace. Sapendo che:

$$V_{\text{eff.}} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \qquad I_{\text{eff.}} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

e tralasciando per semplicità gli indici eff. avremo:

$$v = \sqrt{2}\, V \operatorname{sen} \omega t$$

$$i = \sqrt{2}\, I \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Definendo ora come reattanza capacitiva x_c il rapporto tra tensione e corrente efficace ed essendo $I = CV\omega$ si avrà:

$$\frac{V}{I} = x_c = \frac{1}{\omega C}$$

oppure l'equivalente

$$\frac{V}{I} = x_c = \frac{1}{C 2\pi f}. \qquad 4)$$

Ricavando ora la capacità C dalla 4) si ottiene:

$$C = \frac{I}{2\pi f V}$$

in cui f rappresenta la frequenza della corrente alternata.

Nota la corrente I la tensione alternata V e la frequenza si ricava la capacità in farad.

L'energia posseduta da un condensatore è uguale al lavoro che si è compiuto per caricarlo. Ricordando che si è definito il potenziale come il lavoro sulla carica unitaria si avrà quindi per l'aumento di energia dw dovuto all'aumento dq di cariche:

$$dw = V\,dq,$$

cioè integrando su tutte le cariche q si ha:

$$W = \int V\,dq;$$

ma $q = CV$ da cui $dq = C\,dV$ e sostituendo quest'ultima a dq si ha:

$$W = C \int V\,dV = \tfrac{1}{2}CV^2.$$

Strumentazione

Frequenziometro: SIPIE-F1; « Pozzi e Trovero S.p.a. » Milano;

Mod. S111;

N. 26721.

Interruttore: IN 525; « Ticino »;

N. 1603;

Tarato: 20 A;

Tensione: 320 V.

Voltmetro: VA 6; « Precision » Milano;

N. 210669;

Tipo: verticale per c. alternata;

Tensione di prova: 500 V.

Sono state eseguite quattro prove diverse sul condensatore M2, sul condensatore M3, sui due in parallelo e sui due in serie. Per ogni prova sono state eseguite tre letture variando la tensione agendo sul circuito potenziometrico: dalla media delle tre letture si è ricavata la capacità in μF.

Condensatori	N.	Corrente			Tensione			Capacità		Energia
		δ	k	I	δ	k	V	C		W
		div.	A/div.	A	div.	V/div.	V	μF		J
M 2	1	1	0,5	0,5	77	1	77	20,7		$6{,}25 \cdot 10^{-3}$
	2	2		1	150		150	21,2	21,06	$236 \cdot 10^{-3}$
	3	2,9		1,45	217		217	21,3		$495 \cdot 10^{-3}$
M 3	1	0,5		0,25	79		79	10,03		$32 \cdot 10^{-3}$
	2	1		0,5	155		155	10,24	10,24	$123 \cdot 10^{-3}$
	3	1,4		0,7	215		215	10,40		237.10^{-3}
Parallelo	1	1		0,5	50		50	30,19		$37{,}5 \cdot 10^{-3}$
	2	2		1	100		100	30,19	30,19	$150{,}8 \cdot 10^{-3}$
	3	3		1,5	150		150	30,19		$338 \cdot 10^{-3}$
Serie	1	0,3		0,15	72		72	6,65		$17{,}4 \cdot 10^{-3}$
	2	0,6		0,3	140		140	6,83	6,79	$66 \cdot 10^{-3}$
	3	0,9		0,45	208		208	6,90		$145 \cdot 10^{-3}$

Esercizio 12

Misura di una induttanza senza ferro col metodo del confronto delle tensioni

I metodi per la misura delle induttanze sono molti. Fra questi quello indicato nella presente esercitazione.

Il circuito è essenzialmente costituito da una resistenza variabile in serie alla induttanza.

Si regoli la resistenza in modo che V_R sia eguale a V_L (fig. 18).

Il valore della resistenza variabile e della resistenza ohmica della induttanza va letto poi col metodo del ponte di Wheatstone.

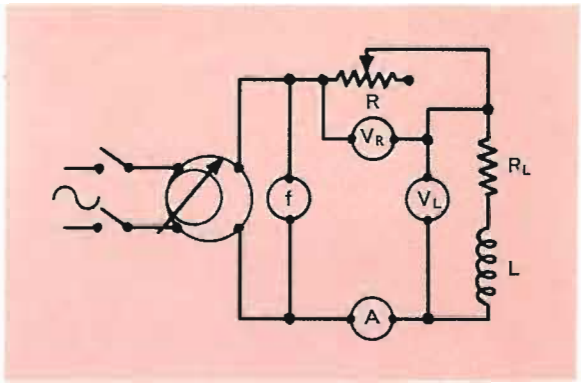
Questo metodo è abbastanza preciso e si presta bene per induttanze sia con piccola sia con grande resistenza ohmica interna.

Importante disporre di due voltmetri precisi e aventi la stessa classe di precisione.

La misura dell'induttanza di una bobina si esegue inserendo in un circuito del tipo rappresentato nello schema una resistenza variabile, in serie con la bobina stessa, e derivando ai capi di entrambe due voltmetri della stessa classe.

Operando opportunamente sulla resistenza variabile, si fanno coincidere i valori della caduta di tensione che si ha nell'interno del reostato e della

Fig. 18 - Schema misura di una induttanza in aria.



bobina. Chiamando V_R la caduta di tensione del reostato e V_L quella della bobina si avrà:

$$V_R = V_L;$$

ed essendo

$$V_R = RI$$

$$V_L = ZI$$

(dove Z = impedenza = $\sqrt{R_L^2 + X_L^2}$ essendo R_L la resistenza della bobina) sarà evidentemente $R = Z$ poichè la corrente I è sempre la stessa.

Dalla relazione

$$Z = \sqrt{R_L^2 + X_L^2},$$

si ricava

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R_L^2}.$$

Ma siccome è stata precedentemente definita l'induttanza come il rapporto tra X_L ed ω si potrà scrivere.

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{\sqrt{Z^2 - R_L^2}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{R^2 - R_L^2}}{2\pi f}$$

in cui f è la frequenza della corrente alternata. I valori di R ed R_L si misurano col ponte di Wheatstone.

Il valore di f si legge col frequenziometro.

La prova è stata eseguita su due induttanze separatamente; il circuito è alimentato attraverso un regolatore di tensione ad induzione.

I dati sperimentali sono i seguenti:

$$R_{L1} = 0{,}88 \qquad R_1 = 16{,}16 \text{ Ohm} \qquad f = 50 \text{ Hz}.$$

$$L_1 = \frac{\sqrt{16{,}16^2 - 9{,}88^2}}{314} - \frac{\sqrt{163{,}5312}}{314} = 0{,}0407 \text{ H}.$$

$$R_{L2} = 2{,}60 \qquad R_2 = 4{,}03.$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{4{,}03^2 - 2{,}6^2}}{314} - \frac{\sqrt{9{,}4809}}{314} = 0{,}0098 \text{ H}.$$

Strumentazione

Interruttore: IN 5-25; « Ticino »;
Tarato per 10 A.

Reostato: R O-4; « Seci » Milano;
Tipo: 506/S - N. 14074;
Resistenza: 28 Ω;
Intensità massima sopportabile: 5,5 A.

Amperometro: A.A.1; « Precision » Milano;
Mod. P/2F - N. 11859;
Tipo: orizzontale in corrente alternata, in ferro mobile;
Tensione di prova: 500 V;
Classe: 0,5;
Portata: 1A; k = 1.

Reostato: R32; « Seci » Milano;
Tipo: 506/S - N. 14075;
Resistenza: 35 Ω;
Intensità max: 1,5 A.

Voltmetro: VA 3; « Norma »;
N. 1146470;
Tipo: orizzontale in corrente alternata; magnete fisso e bobina mobile, come raddrizzatore;
Tensione di prova: 2000 V;
Resistenza: 5000 Ω/V;
Classe: 1,5;
Portata: 10 V; K = 1.

Voltmetro: VA 4; « Norma »;
N. 1146471;
Tipo: orizzontale a corrente alternata; magnete fisso, bobina mobile;
Tensione di prova: 2000 V;
Resistenza: 5000 Ω/V;
Classe: 1,5;
Portata: 10 V; $K = 1$.

Induttanza: MIN 31; « Leybold »;
$R_L \cong 10\ \Omega$
Intensità max: 1,25 A;

Induttanza: MIN 54; « Leybold »;
$R_L \cong 2{,}5\ \Omega$;
Intensità max: 2,5 A.

Esercizio 13

Caratteristiche di un galvanometro

Ci si propone di trovare la resistenza interna, e le costanti voltmetrica e amperometrica di un galvanometro.

Si realizza il circuito indicato e si fa circolare una piccola corrente premendo il tasto T_1 (fig. 19).

Si regolano le due resistenze a e b su un determinato valore ohmico abbastanza elevato (10.000 Ω) in modo che la resistenza interna della pila risulti trascurabile. Si può ora chiudere il tasto T_2 e per determinati valori di R_1 si leggeranno le relative deviazioni (δ) segnate dal galvanometro.

I dati così ottenuti ci permettono di fare il ragionamento seguente.

Definiamo pila ridotta la parte di circuito che comprende la pila e le resistenze a e b. La resistenza globale della pila ridotta risulta quindi essere:

$$s = \frac{a(b+r)}{a+b+r},$$

ma abbiamo considerato trascurabile r della pila per cui:

$$s' = \frac{ab}{a+b}.$$

La d.d.p. fra M e N risulta essere

$$e' = ai \qquad i = \frac{E}{a+b+s'}$$

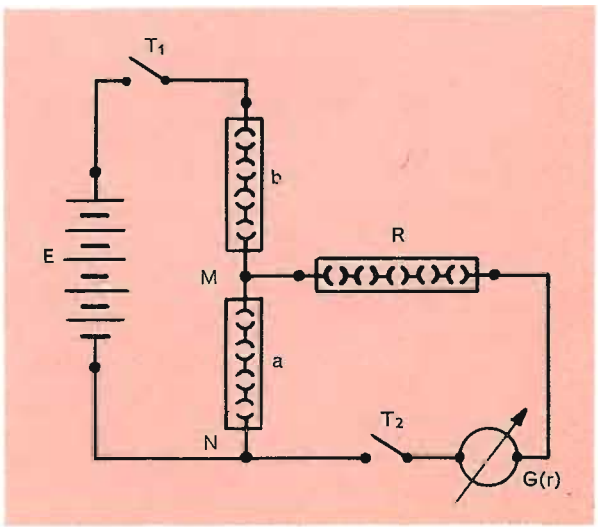


Fig. 19 - Schema di taratura galvanometro.

quindi

$$e' = \frac{E}{a + b + s'} a.$$

Chiudendo T_2 il galvanometro è attraversato da una corrente: indichiamo con δ il numero di divisioni di cui devia l'ago dello strumento e con K_a la costante amperometrica scalare del galvanometro, avremo:

$$i = K_a \cdot \delta.$$

Abbiamo perciò indicando con r_g la resistenza del galvanometro:

$$i = \frac{e'}{R + r_g + s'} = K_a \cdot \delta$$

che possiamo risolvere con un sistema del tipo

$$\begin{cases} K_a \cdot \delta_1 = \dfrac{e'}{R_1 + r_g + s_1} \\ K_a \cdot \delta_2 = \dfrac{e'}{R_2 + r_g + s_1} \end{cases}$$

ottenuto variando R da R_1 a R_2 ed effettuando le letture δ_1 e δ_2.

Possiamo quindi ricavare r_g e poi K_a ed infine la costante voltmetrica scalare $K_v = K_a \cdot r$

N.	Resistenza a	Resistenza b	Resistenza R	Divisioni galvanometro	E pila
	Ω	Ω	Ω	δ	V
1	10.000	10.000	3.000	4	6,3
2	10.000	10.000	9.700	2,2	6,3

Passando ai calcoli si ha:

resistenza globale pila ridotta

$$s = \frac{a(b + r)}{a + b + r}$$

e poichè $r \simeq 0$, si ha

$$\frac{10^8}{2 \cdot 10^4} = 5 \cdot 10^3\ \Omega.$$

La differenza di potenziale fra M e N risulta:

$$e' = \frac{E}{a+b+s'} \cdot a = \frac{6{,}3 \cdot 10^4}{10^4 + 10^4 + 5 \cdot 10^3} = 2{,}5 \text{ Volt};$$

la corrente che attraversa il galvanometro sarà:

$$i = K_a \cdot \delta$$

$$i = \frac{e'}{R + r_g + s'} = K_a \delta.$$

Perciò si pone il sistema:

$$\begin{cases} K_a \delta_1 = \dfrac{e'}{R_1 + r_g + s'} \\ K_a \delta_2 = \dfrac{e'}{R_2 + r_g + s'}. \end{cases}$$

Risolvendo il sistema si ricava

$$r_g = 188\ \Omega.$$

Sostituendo questo valore nella prima equazione, dal sistema ricaviamo K_a costante amperometrica:

$$K_a = \frac{e'}{\delta_1 (R_1 + r_g + s')} = \frac{2{,}5}{4(3000 + 188 + 5000)} = 76 \cdot 10^{-6},$$

da cui

$$K_v = K_a \cdot r_g = 76 \cdot 10^{-6} \cdot 188 = 14{,}2 \cdot 10^{-3}.$$

Riassumendo si ha:

$$K_a = 76{,}1 \cdot 10^{-6}$$
$$K_v = 14 \cdot 10^{-3}$$
$$r_g = 188\ \Omega.$$

Strumentazione

Accumulatore: «Tudor Alcalini»; N. 3744/4 3/61; Tipo 5/5054 - 6 V;
Capacità: Ah10 in 5 h.
Corrente di scarica: normale 2 - max 8; Elettrolita = 1,20;
Corrente di carica: normale 2 - max 4.

Galvanometro: «Welch Scientific Co.» G2WM; N. 50056-62 a zero centrale.

Cassetta resistenza a spine: RC7 «Allocchio Bacchini»; Mod. 1550;
N. 510154 fino 11.110 Ohm;
RC8 «Allocchio Bacchini»; Mod. 1550; N. 510142 fino 11.110 Ohm.

Cassetta a decadi: RCI «Allocchio Bacchini»; N. 00797 fino 10.000 Ohm.

Tasto: 3 N. 70880 «Allocchio Bacchini».

Esercizio 14

Misura della potenza in c.c. metodo volt-amperometrico

Per determinare la potenza in c.c. assorbita da un utilizzatore o la potenza erogata da un generatore ci serviamo di due strumenti: un voltmetro per c.c. e un amperometro per c.c.

Dal prodotto della tensione V per la corrente I si ottiene la potenza assorbita ad esempio da un utilizzatore:

$$P = VI \text{ [Watt]}.$$

Lo schema da adottare è quello della fig. 20.

Per determinare la potenza esatta bisogna tenere conto del consumo proprio degli strumenti. Con lo schema di fig. 20 si ha il voltmetro a valle dell'amperometro; ciò determina un assorbimento di corrente

$$i_V = \frac{V}{R_V}$$

quindi la lettura effettuata sull'amperometro deve essere diminuita del valore della corrente i_v assorbita dal voltmetro; avremo quindi

$$P = V(I - i_V) = V \cdot I - V \cdot i_V = VI - \frac{V^2}{R_V},$$

dove V^2/R_v rappresenta la potenza propria assorbita dal voltmetro.

Per effettuare questa misura bisogna scegliere quindi un voltmetro per c.c. di resistenza interna R_v nota.

Se poniamo il voltmetro a monte dell'amperometro (vedi fig. 21) la tensione misurata risulterà in eccesso. Per una misura corretta occorre quindi sottrarre alla tensione V letta la caduta di tensione provocata dall'amperometro R_aI, quindi:

$$P = (V - R_aI) \cdot I = VI - R_aI^2$$

dove R_aI^2 rappresenta la potenza assorbita dall'amperometro; occorre pertanto scegliere un amperometro di cui si conosca la resistenza interna R_a.

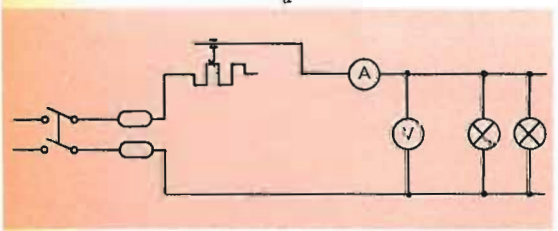


Fig. 20 - Schema di misura di una potenza volt-amperometrica.

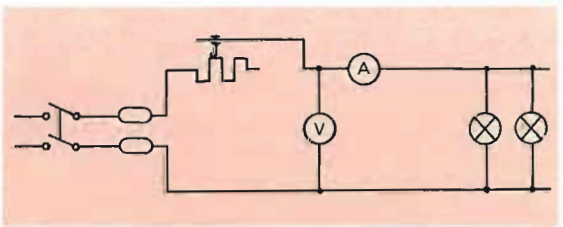


Fig. 21 - Schema di misura di una potenza volt-amperometrica.

L'errore che si commette nei due casi per la misura della potenza assorbita da un utilizzatore è in eccesso. Scegliendo opportunamente l'amperometro con resistenza interna bassissima e il voltmetro con resistenza interna elevata l'errore può risultare trascurabile e la misura attendibile senza introdurre la correzione.

La potenza risulta in questo caso:

$$P = VI \text{ [Watt]}.$$

Se invece volessimo misurare la potenza erogata da un generatore il prodotto VI [Watt] risulterebbe una misura per difetto.

Gli errori che si commettono con questo metodo sono errori sistematici dovuti al metodo di misura adottato.

Esercizio 15

Misura di una potenza in c.a. mediante l'uso di un wattmetro e determinazione del cos φ mediante un voltmetro e un amperometro

Ci si propone di conoscere il fattore di potenza di una corrente alternata; all'uopo si usa un circuito in cui vengono collegati un voltmetro, un wattmetro ed un amperometro (fig. 22).

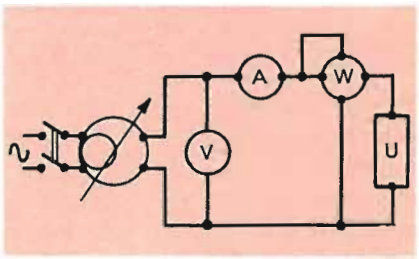


Fig. 22 - Schema di misura di una potenza di un circuito in c.a.

Dalla relazione:

$$P = VI \cos \varphi$$

si può ricavare

$$\cos \varphi = \frac{P}{VI}$$

dove $VI = P_a$ rappresenta la potenza apparente. Dalla tabella che segue si nota che il valore del cos φ varia seppur minimamente; ciò è dovuto al fatto che l'utilizzatore usato è costituito da un motore elettrico a c.a. il cui avvolgimento ha un carattere induttivo che varia al variare della corrente.

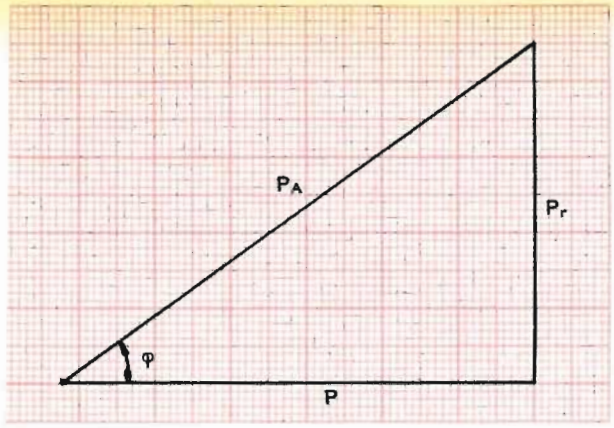
Per la costruzione del triangolo delle potenze si sono assunti i valori medi onde rispecchiare l'andamento medio della esperienza.

Ne risulta un valore medio dell'angolo di 35°37′4″.

Strumentazione

Wattmetro:

«Allocchio Bacchini»; N. 15582; Mod. 2988; Tensione di prova 2000 V; classe 1; tipo elettrodinamico; f.s. 150 div.; $k = 5$; portate 150 V ÷ 5 A.



$P_A = \sqrt{P^2 + P_r^2} = VI$ (potenza apparente)
$P = VI \cos \varphi$ (potenza attiva)
$P_r = VI \operatorname{sen} \varphi$ (potenza reattiva)
$\varphi = 35°37'4''$

Fig. 23 - Diagramma vettoriale.

Voltmetro:

VA2 «Allocchio Bacchini»; N. 680032; Mod. 2709; tipo elettromagnetico; Tensione di prova 500 V $\simeq$; f.s. 300 div.; $k = 1$; classe 0,5.

Amperometro:

AA2 «Allocchio Bacchini»; N. 680051; Mod. 2723; tipo elettromagnetico; Tensione di prova 500 V $\simeq$; f.s. 5 div.; $k = 1$; classe 0,5.

Variatore di tensione.

N.	Voltmetro	Amperom.	Wattmetro			$\cos \varphi = \frac{P}{VI}$
	V	A	δ	k	W	
1	155,5	1,0	26,8	5	134	0,86174
2	154,5	1,5	38,8		194	0,83718
3	154,0	2,0	50,4		252	0,81818
4	153,5	2,5	62,2		311	0,81042
5	153,0	3,0	74,2		371	0,80828
6	152,0	3,5	86,0		430	0,80827
7	152,0	4,0	97,0		485	0,79770
8	151,0	4,5	106,0		530	0,77999
9	151,0	5,0	120,0		600	0,79470

Nota: Nelle colonne riguardanti il voltmetro e l'amperometro sono riportati direttamente i valori in quanto la **k** degli strumenti è = 1.

Nel grafico di fig. 23 è riportato il triangolo delle potenze dal quale si vede che è:

$$P_A = \sqrt{P^2 + P_r^2} = VI \quad \text{(apparente)}$$

$$P = VI \cos \varphi \quad \text{(attiva)}$$

$$P_r = VI \operatorname{sen} \varphi \quad \text{(reattiva).}$$

Per un valore medio corrispondente ad un $\cos \varphi = 0{,}81294$ si ha un angolo φ di $35°37'4''$.

Esercizio 16

Taratura di un voltmetro mediante potenziometro (in corrente continua)

Gli strumenti di misura indicati, pur nelle loro realizzazioni più pregiate e nelle migliori condizioni d'esercizio, non consentono approssimazioni maggiori del 0,2%. Il metodo di lettura diretta è perciò non sufficiente per tarature di strumenti di classe elevata (0,2, 0,5) e si ricorre quindi ai metodi indiretti; fra questi il metodo di opposizione o potenziometrico è fondamentale per la taratura di strumenti elettromagnetici. Scopo dell'esercitazione è appunto la taratura di un voltmetro col metodo di opposizione o potenziometrico, nonchè la rilevazione del grafico d'errore dello strumento: $\varepsilon\% = f(V)$.

Il principio informatore del metodo consiste nel paragonare, mettendoli in opposizione tra loro, la tensione incognita V_a con la caduta di tensione che si determina in una resistenza campione variabile percorsa da una corrente di valore noto e costante.

Si costruisca allo scopo un circuito ausiliario alimentato da una batteria di $\sim$ 2V e comprendente una resistenza di regolazione R_A, due resistenze campione M ed N ed un galvanometro (usato solo come rilevatore, e non come misuratore di corrente) (fig. 24).

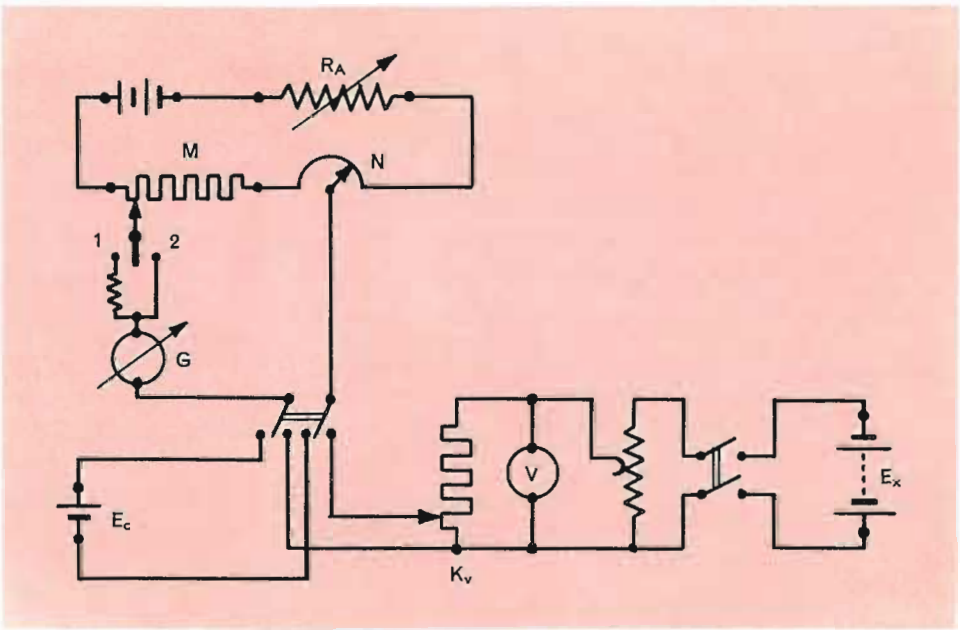


Fig. 24 - Schema circuito potenziometrico.

Nel circuito ausiliario (potenziometro) viene inserita a mezzo di un commutatore una pila campione tipo Weston ($E_c = 1{,}0183$ V) in opposizione con la batteria del potenziometro. Si regolano quindi le resistenze M ed N in modo che la loro somma sia 1018,3 Ω e si ricerca per mezzo della resistenza R_A, che poi non va più toccata, la posizione di equilibrio del galvanometro. Si è così eseguita la compionatura del potenziometro che risulta in grado di erogare la corrente:

$$\frac{E_c}{M+N} = 1 \text{ mA}.$$

Per mezzo del commutatore si inserisce ora il potenziometro nel circuito di prova (su cui è derivato il voltmetro da tarare) avendo cura che le due f.e.m. siano in opposizione. Evidentemente sul circuito di prova sarà in generale necessario inserire un partitore di tensione (K_v), cioè un apparecchio in grado di prelevare una parte proporzionale sufficientemente piccola della tensione incognita per esempio 1/10 o 1/100.

Premesso ciò per eseguire la taratura del voltmetro si opera nel modo seguente: si legge la tensione incognita sul voltmetro da tarare (es.: 150 V); essa viene ridotta a 1/100 dal divisore K_v, cosicchè ai capi del potenziometro si hanno 1,5 V. Si opera quindi sulle resistenze M ed N, fino ad equilibrare il galvanometro. La caduta di tensione nel potenziometro $(M + N)I$ sarà quindi numericamente uguale a 1/100 dalla tensione incognita, misurata dal voltmetro approssimativamente in 150 V. Precisamente risulta $M + N = 1501{,}3$ Ω; $I = 1$ mA; $V_x = 1{,}5013 \cdot 100 = 150{,}13$ V.

Eseguendo un conveniente numero di letture si ottiene così il grafico di errore del voltmetro (fig. 25).

Fig. 25 - Curva di taratura di un voltmetro.

Strumentazione

Stabilizzatore: 3923 «Selo»; Bassa tensione continua; Mod. S B321 AR; N. 1751.

Voltmetro: R_i 1500 Ohm/V; «Precision» Milano; Mod. PZ; N. 11860.

Potenziometro: PZ 1 c.c.; Mod. PT/2 S.E.B.

Galvanometro: G 11 Kipp Liglitstop.

Interruttore: min. II.

Accumulatori: «Tudor Alcalini» BT4.

Elemento campione Weston: N. 664107.

Resistenza campione: RC 14 - 100 Ohm int. bei 20° C., manganina.

Prova	Voltmetro			Potenziom.	Errori		
	V_t			V_c	ε_a	ε_r	$\varepsilon\%$
N.	δ	k	V	$(M.N)\ I \cdot k_r$ V	$V_t - V_c$	$\frac{V_t - V_c}{V_c}$	$\varepsilon_r \cdot 100$
	div.	V/div.	V				
1	150	1	150	150,13	—0,13	0,00087	0,087
2	140		140	140,14	—0,14	0,0099	0,099
3	130		130	130,2	—0,2	0,00154	0,154
4	120		120	119,56	+0,44	0,00367	0,367
5	110		110	109,36	+0,64	0,00581	0,58
6	100		100	99,47	+0,53	0,0053	0,53
7	90		90	89,71	+0,29	0,00322	0,322
8	80		80	79,52	+0,48	0,006	0,6
9	70		70	69,67	+0,33	0,00472	0,472
10	60		60	59,85	+0,15	0,0025	0,25
11	50		50	49,65	+0,35	0,007	0,7
12	40		40	39,72	+0,28	0,007	0,7
13	30		30	29,79	+0,21	0,007	0,7
14	20		20	19,75	+0,25	0,0125	1,25
15	10		10	9,75	+0,25	0,025	2,5
16	0	↓	0	0	0	0	0

Note: $k_r = 100$. $I = 1\ m \cdot A$.

Esercizio 17

Determinazione della cifra di perdita dei lamierini magnetici con l'apparecchio di Epstein

La cifra di perdita esprime (in Watt) la potenza che si dissipa per isteresi e per correnti parassite in un chilogrammo di lamiera quando il materiale sia sottoposto a magnetizzazione alternativa, ad una data frequenza e ad una data induzione (1 Weber/m^2).

Essa è quindi espressa in Watt per chilogrammo (W/kg). In particolare, la cifra di perdita che commercialmente distingue i vari tipi di lamiera è riferita alle seguenti condizioni:

induzione massima $B_M = 1$ weber/m^2; frequenza $f = 50$ Hz.

Per la determinazione industriale della cifra di perdita si usano apparecchi e si seguono metodi fissati da norme convenzionali; metodi di prova più rigorosi si possono seguire adottando circuiti magnetici perfetti (a forma di toro) che presentano però l'inconveniente di richiedere l'esecuzione, volta per volta, degli avvolgimenti necessari alle prove.

Per eseguire le prove con l'apparecchio di Epstein occorrono circa 10 kg di striscie di lamiera, lunghe 500 mm e larghe 30 mm, tagliate per metà nel senso della laminazione e per metà in senso trasversale. Le striscie devono essere prive di bave e devono essere isolate l'una dall'altra con carta, vernice od altro.

Con le striscie si formano quattro pacchetti uguali, che vengono introdotti nelle quattro bobine che costituiscono l'apparecchio di Epstein, in modo da formare un circuito magnetico quadrato, con giunti alternati.

Le quattro bobine dell'apparecchio portano, ciascuna, due avvolgimenti di 150 spire; un avvolgimento magnetizzante o primario, esterno, ed un avvolgimento secondario, interno: tali avvolgimenti occupano, in lunghezza, uno spazio di 42 cm. I quattro avvolgimenti primari sono collegati tra loro in serie, e così pure i secondari; di guisa che, col circuito magnetico, sono concatenati due avvolgimenti, primario e secondario, di 600 spire ciascuno (fig. 26).

I due avvolgimenti sono inseriti come indicato nello schema: il primario è alimentato a tensione alternata (fornita da un alternatore o da un regolatore ad induzione) variabile entro i limiti che corrispondono ai valori massimo e minimo dell'induzione magnetica B: in serie ad essi sono inseriti un amperometro e la bobina amperometrica del wattmetro; il secondario alimenta il circuito voltmetrico del wattmetro ed il voltmetro, attraverso due tasti 1 e 2. L'adozione del circuito secondario, che fornisce direttamente la f.e.m. E dalla quale si può dedurre il valore dell'induzione B e che, applicata al wattmetro, dà, con la corrente, la potenza dissipata

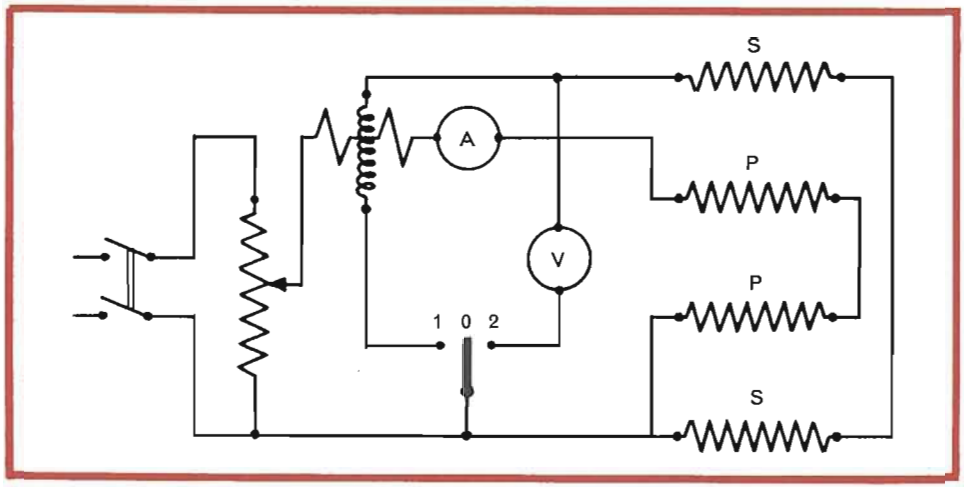


Fig. 26 - Schema misure mediante apparato Epstein.

nel nucleo di ferro, consente di evitare i computi che si dovrebbero eseguire, qualora si alimentasse il wattmetro ed il voltmetro con la stessa tensione che si applica al primario, per tenere conto della caduta di tensione e delle perdite nell'avvolgimento magnetizzante.

La corrente che passa nei circuiti voltmetrici, provenendo dal secondario dell'apparecchio Epstein, provoca però negli avvolgimenti una caduta di tensione che conviene ridurre al minimo; il wattmetro ed il voltmetro non vengono, quindi, letti contemporaneamente; i tasti 1 e 2 consentono di inserire l'uno e l'altro strumento per la lettura.

Il wattmetro, poi, indica, oltre alla potenza P_n da misurare anche la potenza $p(= E^2/R_w)$ consumata nel suo circuito voltmetrico: ma di questa si tien conto, sottraendola dalla potenza P_l indicata dal wattmetro.

Il valore della induzione massima B_M (espressa in Weber/m^2) viene dedotta dal valore di E mediante l'espressione (letta sul voltmetro)

$$B_M = \frac{E}{4{,}44 f N s}$$ se s (sezione netta del ferro) è espressa in m^2

oppure

$$B_M = \frac{10^4 E}{4{,}44 f N s}$$ se s è espressa in cm^2.

N rappresenta il numero delle spire dell'avvolgimento secondario (= 600).

(*NB.* – L'espressione di B_M vale soltanto nel caso — qui supposto — in cui il flusso magnetico sia sinusoidale; E rappresenta il valore efficace della f.e.m.).

Dalla stessa espressione si deduce anche il valore di E che corrisponde al massimo valore di B_M che si vuol raggiungere durante le prove e che è utile tenere presente a titolo di orientamento.

$$E = 4{,}44\, f\, N s B_M \text{ (se è espresso in m}^2\text{)}$$

$$E = 4{,}44\, f\, N s B_M\, 10^{-4} \text{ (se è espresso in cm}^2\text{)}.$$

Si tenga presente a questo proposito, che con l'apparecchio di Epstein si ottengono risultati attendibili soltanto fino a $1{,}3 \div 1{,}5$ Weber/m^2.

Il valore della sezione netta s del ferro non si deduce dalla dimensione delle lamiere, bensì dal peso totale G, dalla lunghezza l del circuito magnetico e dalla densità δ del materiale:

$$s = \frac{G}{l\delta};$$

se G è espresso in grammi, l in cm, δ in g/cm^3, la sezione risulta espressa in cm^2.

Se la densità non è nota, o non è misurabile, si può assumere per essa un valore (supposto) a seconda della natura delle lamiere; se poi, in realtà, la densità è diversa da quella supposta ed ha il valore δ', i risultati della misura sono ancora utilizzabili, potendosi riferire le cifre di perdita, invece che all'induzione B_M ricavata in base a δ, all'induzione $B'_M = (\delta'/\delta)B_m$.

Formule usate nella prova:

$$B_M = \frac{10^{-4}E}{4{,}44\, fNS}$$

sezione netta ferro

$$s = \frac{G}{l\delta} = 7{,}45 \text{ cm}^2 .$$

Strumentazione

Wattmetro: N. 59437; tipo elettrodinamico $\simeq$; classe 0,2; tensione di prova 2000 Volt; da usare con quadrante orizzontale; portate amperometriche 1-2 A; portate voltmetriche 75-150-300 V; portate usate nella misura 75 V - 1 A; Div. 150; $k = 0{,}5$ W/div.

Voltmetro: N. 11841; tipo elettromagnetico $\simeq$; classe 0,5; tensione di prova 500 Volt; da usare con quadrante orizzontale; portata 75-150-300 Volt; portata usata 150 Volt; Div. 150; $k = 1$ V/div.

Amperometro: N. 1872; tipo magnetoelettrico con raddrizzatore; tensione di prova 500 V; portate in c.c. 0,03-0,3-1,5-6 A, in c.a. 0,03-0,3-1,5-6 A; Div. 3.

Reostato: N. 14075; prestazione 350 Ω - 1,5 A.

Epstein: N. 74663; Mod. 1621; peso lamiera per trasformatori 11,338 kg; peso specifico lamiera $\gamma = 7{,}5$ g/dm³.

N.	Amperometro			Voltmetro			Wattmetro				P_{fe}	P_{fe}/G	B_m	E^2/Rw
	δ	k	I	δ	k	V	δ	k	P	R_w	—	—	—	—
	div.	A/div.	A	div.	V/div.	v	div.	watt div.	W	Ω	w	w/kg	w_b/m^2	watt
1	0,12	0,5	0,06	50	1	50	6,5	0,5	3,25	2500	2,25	0,198	0,496	1,00
2	0,15	↓	0,075	60	↓	60	8,9	↓	4,45	↓	3,01	0,265	0,596	1,44
3	0,19	↓	0,095	70	↓	70	11,5	↓	5,75	↓	3,79	0,334	0,695	1,96
4	0,20	↓	0,1	80	↓	80	15	↓	7,50	↓	4,96	0,438	0,794	2,56
5	0,27	↓	0,315	90	↓	90	18,6	↓	9,30	↓	6,06	0,532	0,894	3,24
6	0,32	↓	0,16	100	↓	100	22,8	↓	11,40	↓	7,40	0,653	0,993	4,00
7	0,42	↓	0,21	110	↓	110	27,2	↓	13,60	↓	8,74	0,772	1,092	4,86

I valori sopra indicati possono essere tracciati nei due diagrammi (figg. 27 e 28).

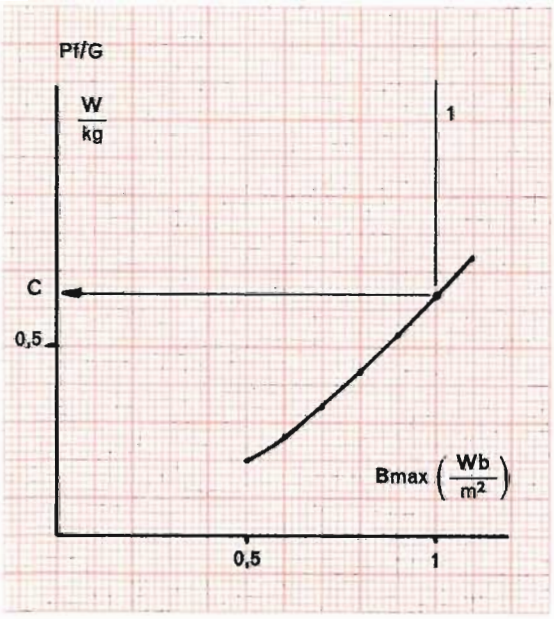


Fig. 27 - Diagramma perdite in funzione dell'induzione.

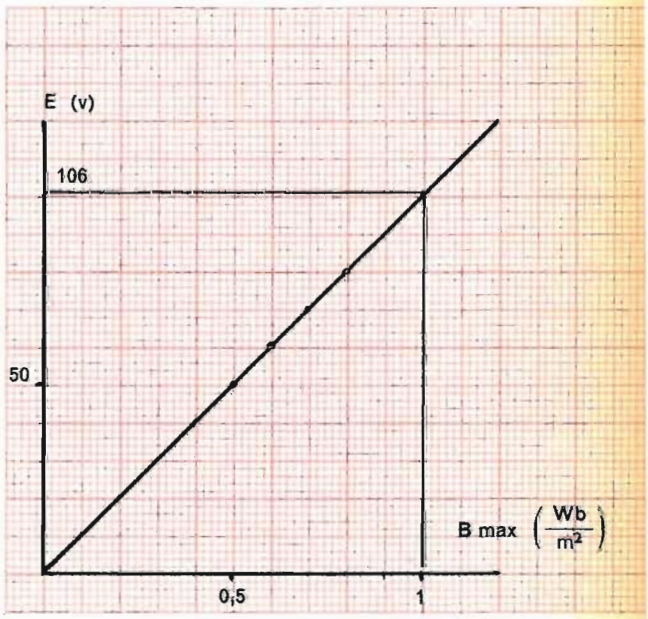


Fig. 28 - Diagramma tensione-induzione.

Esercizio 18

Misura della potenza attiva trifase con il metodo Aron

La misura della potenza assorbita da un circuito trifase si può eseguire con un unico wattmetro solo se il sistema è simmetrico ed equilibrato, usando però un centro artificiale, cosa che nella pratica avviene assai raramente.

Un metodo semplice per misurare la potenza su circuiti asimmetrici e squilibrati è quello rappresentato dall'inserzione Aron di due wattmetri, come in figura 29.

Le bobine amperometriche sono in serie su due fasi qualunque (1 e 3 ad esempio), e le rispettive voltmetriche derivate tra la fase stessa e la terza fase. È facile dimostrare che, con qualunque tipo di carico, $P_{tot} = P_1 + P_3$, cioè che la potenza totale è uguale alla somma *algebrica* delle potenze segnate dai due wattmetri. Infatti indicando le tre potenze di fase:

$$P_{w1} = \vec{I}_{12} \times \vec{V}_{12}$$

$$P_{w2} = \vec{I}_{23} \times \vec{V}_{23}$$

$$P_{w3} = \vec{I}_{31} \times \vec{V}_{31}$$

$$P_{tot} = \vec{V}_{12} \times \vec{I}_{12} + \vec{V}_{23} \times \vec{I}_{23} + \vec{V}_{31} \times \vec{I}_{31}$$

ma

$$\vec{V}_{12} + \vec{V}_{23} + \vec{V}_{31} = 0$$

quindi

$$\vec{V}_{31} = -\vec{V}_{12} - \vec{V}_{23}$$

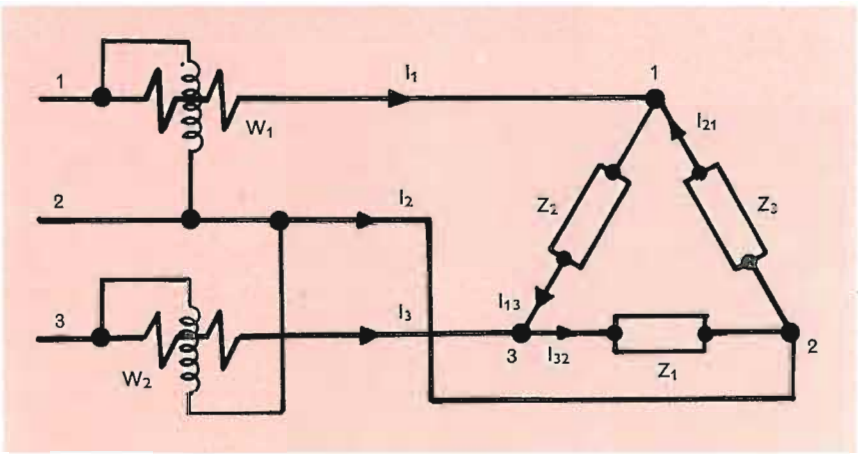
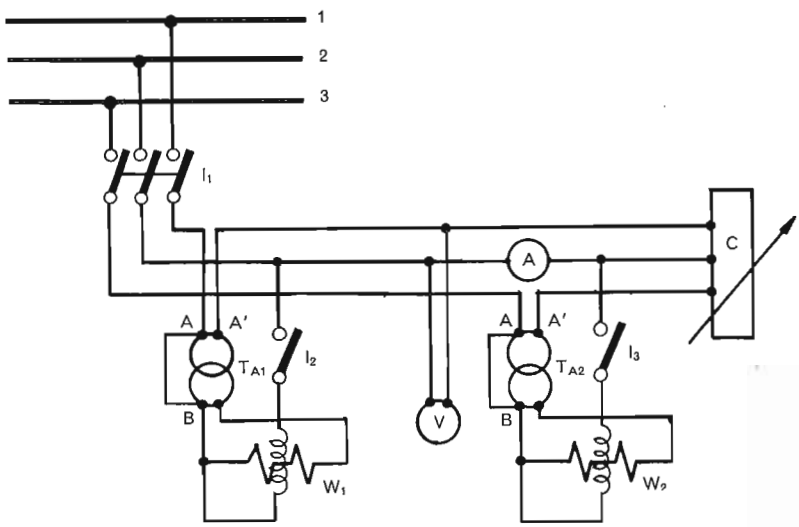


Fig. 29 - Inserzione diretta Aron su circuito trifase.



I_1: interruttore tripolare — I_2, I_3: interruttori unipolari — 1, 2, 3: fasi — **V**: voltmetro — T_{A1}: trasformatore di corrente inserito nella fase 1 — W_1: wattmetro con la bobina amperometrica inserita nella fase 1 — **A**: amperometro — **C**: carico variabile — T_{A2}: trasformatore di corrente inserito nella fase 2 — W_2: wattmetro con la bobina amperometrica inserita nella fase 2.

Fig. 30 - Inserzione con riduttori sistema Aron.

$$P_{tot} = \vec{V}_{12} \times \vec{I}_{12} + \vec{V}_{23} \times \vec{I}_{23} + (-\vec{V}_{12} - \vec{V}_{23}) \times \vec{I}_{31} =$$
$$= \vec{V}_{12} \times \vec{I}_{12} + \vec{V}_{23} \times \vec{I}_{23} - \vec{V}_{12} \times \vec{I}_{31} - \vec{V}_{23} \times \vec{I}_{31} =$$
$$= \vec{V}_{12} \times (\vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}) + \vec{V}_{23} (\vec{I}_{23} - \vec{I}_{31})$$

ma

$$(\vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}) = I_1 \qquad \text{e} \qquad (\vec{I}_{23} - \vec{I}_{31}) = -I_3,$$

per cui

$$P_{tot} = \vec{I}_1 \times \vec{V}_{12} + \vec{I}_3 \times \vec{V}_{23} = P_1 + P_2, \text{ c.v.d.}$$

Inoltre (fig. 30):

$$P_1 = V_{12} I_1 \cos (30^o + \varphi_1)$$
$$P_3 = V_{23} I_3 \cos (30^o - \varphi_3),$$

perciò se il circuito è equilibrato avremo:

a) se le correnti sono in fase (ossia $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$) $P_1 = P_3$;
b) se le correnti sono sfasate $P_1 \pm P_3 = P_{tot}$;
c) se $\varphi < 60^o$ P_1 e P_3 sono entrambe > 0;
d) se $\varphi = 60^o$ $P_1 = 0$ $P_{tot} = P_2$;
e) se $\varphi > 60^o$ $P_1 < 0$.

Se il circuito è quasi simmetrico e quasi equilibrato, potremo scrivere:

$$\begin{matrix}\text{(lettura minore)}\\ \text{(lettura maggiore)}\end{matrix} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{\cos(30^\circ + \varphi)}{\cos(30^\circ - \varphi)} = x,$$

indicando con x il rapporto tra la potenza minore e quella maggiore.

Lo scopo della prova è di costruire la curva $I = f(P)$, in cui P si determina con il metodo di Aron, e così pure il cos φ si ricava con la formula

$$\cos\varphi = \frac{x+1}{2\sqrt{x^2 - x + 1}}$$

o con i diagrammi cos $\varphi = f(x)$.

Avremo:

$$I = \frac{P_{tot}}{\sqrt{3}\, V \cos\varphi};$$

i valori di I così trovati si possono confrontare con quelli letti su un amperometro inserito in serie con una delle tre fasi, e si vede che circa coincidono.

All'atto della chiusura del circuito è conveniente cortocircuitare i morsetti AA' dei trasformatori per evitare che possano venire danneggiati dalla intensa corrente di avviamento. Gli strumenti sono inseriti mediante TA; raggiunta l'intensità di regime si tolgono i cavalletti, e si iniziano le letture di P_1 e P_2, che devono essere contemporanee perchè il carico oscilla continuamente. Variando il carico C si ottengono diverse serie di valori di P_1, P_2 e I_A. La tensione rimane costante per tutta la durata della prova.

Nel nostro caso sia P_1 che P_2 sono sempre positive, segno che cos $\varphi > 0{,}5$.

Abbiamo così tutti i dati necessari per tracciare il grafico $I = f(P)$ di fig. 31.

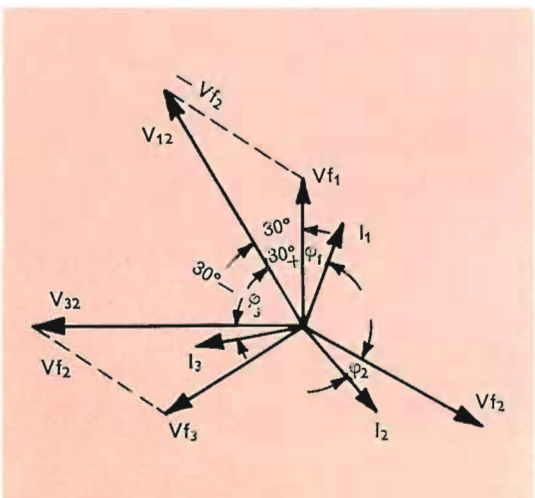


Fig. 31 - Diagramma vettoriale di misura delle potenze.

N.	Voltmetro	Amperometro			Wattmetro W_1			Wattmetro W_2			X	cos φ	I ricav.
	V	δ div.	k A div.	I A	δ div.	k W div.	P_1 W	δ div.	k W div.	P_2 W			A
1	212	2,5	1	2,5	25	20	500	8	10	80	0,160	0,632	2,5
2		3		3	31		620	19,5		195	0,315	0,737	3
3		4,1		4,1	44		880	39		390	6,430	0,818	4,2
4		5,1		5,1	54		1080	50,5		505	0,467	0,837	5,1
5		6,1		6,1	64		1280	55		550	0,430	0,818	6,1
6		7		7	74		1480	60		600	0,405	0,803	7,05
7		8,1		8,1	85,5		1710	73,5		735	0,430	0,818	8,14
8		9,1		9,1	94,5		1890	75,5		755	0,400	0,800	9,2
9		9,9		9,9	102,5		2050	86		860	0,420	0,813	9,8

Note: k voltmetro = 1. $P_{tot} = P_1 + P_2$. I ricavata $= \dfrac{P_{tot}}{\sqrt{3}\,V \cos\varphi}$; $\cos\varphi = \dfrac{x+1}{2\sqrt{x^2-x+1}}$.

Strumentazione

Interruttore: tripolare «Ticino» 380 V ~; *In* = 5-25 A; N. 1603.

Interruttore: bipolare «Allocchio Bacchini»; Mod. 1607; N. 70879.

Voltmetro: «Norma» N. 1146470; portata f.s. 300-100-30-10-3-1 V; classe di precisione 1,5; 5000 Ω/V; tipo magnetoelettrico con raddrizzatore; tensione di prova 2000 V; corrente alternata.

Amperometro: Tester «Chauvin-Arnoux»; N. 1696B 12/25.

Wattmetri Seb: «Allocchio Bacchini» 2988; N. 680029 e N. 680028; portate amperometriche 2,5-5 A; portate voltmetriche 600-300-150 V; tipo elettrodinamici; quadrante da disporsi orizzontalmente; tensione di prova 2000 V; per corrente alternata; classi di precisione 0,5-100 Ω/V.

Trasformatori di corrente a rapporti multipli Seb: tipo BC; N. 1305 e N. 1313; tensione nominale 600 V.

Esercizio 19

Taratura di un contatore con carico fittizio a cos φ 1 e 0,5

Questo tipo di taratura si effettua mediante un cronometro contasecondi e un wattmetro.

Per ottenere una buona rilevazione della potenza del circuito, (segnata dal wattmetro) è necessario che il carico resti rigorosamente costante per tutta la durata di ogni singola lettura. Inoltre si ricorre all'artifizio di usare un «carico fittizio» in modo da rendere indipendenti fra di loro i circuiti amperometrici e quelli voltmetrici di misura. In questa condi-

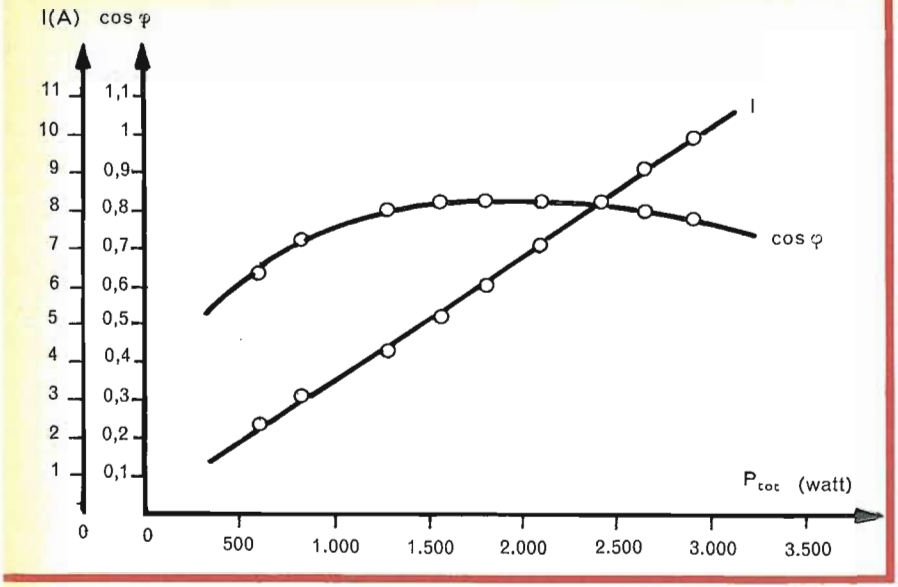


Fig. 32 - Curve sperimentali corrente e fattore di potenza.

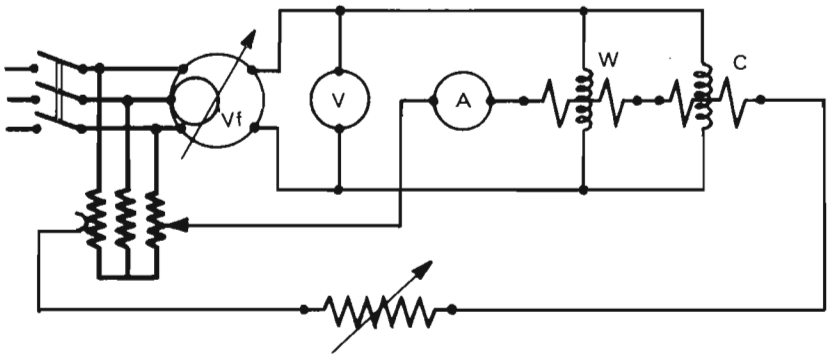


Fig. 33 - Circuito per la taratura di un contatore.

zione, nel circuito amperometrico, nel quale sono inseriti un amperometro e le amperometriche del wattometro e del contatore, circola una corrente relativamente alta con una tensione applicata piuttosto bassa, in modo da impegnare una potenza piccola. Nel circuito voltmetrico invece avremo applicato una tensione elevata e una corrente piccola. Pertanto il wattmetro ed il contatore segneranno una potenza (e una energia) risultante dal prodotto vettoriale dei due valori applicati (fig. 33).

Per rilevare le curve d'errore $\varepsilon\%$ $[f(W_t)]$ a diversi valori di sfasamento si inserisce nel circuito anche un variatore di fase.

In questa esperienza sono eseguite letture a $\cos\varphi = 1$ e a $\cos\varphi = 0{,}5$ in ritardo; per determinare le condizioni di $\cos\varphi = 1$, si agisce sul variatore di fase in modo da leggere al wattmetro la potenza massima ($P_M = VI \cos 0^o$). Per controllare le condizioni corrispondenti al $\cos\varphi = 0{,}5$ in ritardo, si opera come segue.

Si inserisce la parte metallica di un cacciavite fra i morsetti del circuito amperometrico del wattmetro, dopo averlo messo in condizione di non se-

gnare alcuna potenza ($\varphi = 90^o$); se si nota un impulso positivo dell'ago dello strumento, lo sfasamento risulta in anticipo e si deve ruotare di 180° l'indice del variatore di fase; se invece l'impulso è negativo, siamo nelle condizioni richieste, e per ottenere uno sfasamento corrispondente ad un cos φ di 0,5 basterà sfasare di 60° la corrente rispetto alla tensione.

La spiegazione fisica del fenomeno si riassume così:

a cacciavite inserito il circuito amperometrico del wattmetro si trasforma come in fig. 34.

Vale la relazione vettoriale: $I_w = I_t - I_c$.

Pertanto nel caso di sfasamento di 90° in ritardo, il diagramma vettoriale risulta come in fig. 35. Risulta quindi evidente la differenza di impulso tra lo sfasamento in anticipo e quello in ritardo.

Strumentazione

Wattmetro: W4 Seb; N. 680028; Mod. 2988; strumenti elettrodinamici; classe 0,5; per correnti alternate; tensione di prova 2000 V; quadrante da disporsi orizzontalmente.

Amperometro: «Allocchio Bacchini»; N. 75624; Mod. 2723; strumento elettromagnetico; classe di precisione 0,5; per corrente continua e corrente alternata; tensione di prova 500 V; quadrante da disporsi orizzontalmente.

Reostato: R03 Seci; N. 14073; tipo 406/S.

Contatore monofase: N. 8173541; 1 kWh = 1000 giri; A = 5 (15); V = 220 V; f = 50 Hz.

Voltmetro: VA3 «Norma»; N. 1146470; 5000 Ω/V; tipo magnetoelettrico con raddrizzatore; tensione di prova 2000 V; per corrente alternata.

Variatore di tensione: «Variac» 2.

Interruttore: «Ticino»; In 5-25; tarato 20 A; V = 380.

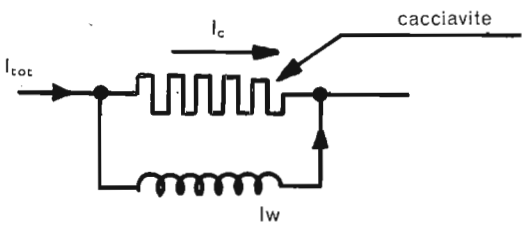


Fig. 34 - Disposizioni di principio per il controllo dell'angolo di fase.

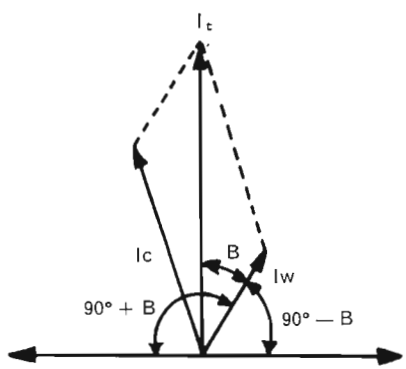


Fig. 35 - Diagramma vettoriale relativo alla fig. 34.

Amperometro			N.	N.	T	Wattmetro			Contatore E_c	Wattmetro E_w	ε_a $E_c - E_w$	ε_r	$\varepsilon\%$	cos φ
δ	k	I	giri/ kWh	giri	sec.	δ	k	P						
div.	A/div.	A				div.	W/div.	W	Wh	Wh	Wh			
5	1	5	1000	30	105	102	10	1020	30	29,8	+0,2	0,005	0,5	1
4	↓	4	↓	24	104	83	↓	830	24	24	0	—	—	↓
3		3		18	104	62		620	18	17,92	+0,08	0,004	0,4	
2		2		12	104	41,8		418	12	12,07	—0,08	0,006	0,6	
1		1		6	102	21		210	6	5,9	—0,1	0,016	1,6	
1	1	1	1000	3	103	10,9	10	109	3	3,1	—0,1	0,031	3,1	0,5
2	↓	2	↓	6	103	20,18	↓	201,8	6	5,7	—0,3	0,052	5,2	↓
3		3		9	103	32		320	9	+9,1	—0,1	0,01	1	
4		4		12	103	43		430	12	12,3	—0,3	0,02	2	
5		5		15	103	53		530	15	15,16	—0,16	0,01	1	

Note: N = 1000 giri/kWh.

$E_c = \frac{n}{N}$ (energia indicata dal contatore).

$E_w = \frac{P_w t''}{3600}$ (energia effettiva misurata dal wattmetro) in cui P_w corrisponde alla potenza segnata dal wattmetro e t'' al tempo in sec

Esercizio 20

Determinazione della caratteristica di magnetizzazione di una dinamo

Scopo dell'esperienza è il tracciamento di un grafico avente per ascissa il valore della corrente di eccitazione e per ordinata il valore della tensione.

In questa prova, poichè la dinamo deve funzionare a vuoto, cioè non deve erogare corrente, il circuito di eccitazione deve essere completamente indipendente dalla dinamo stessa; pertanto la corrente di eccitazione proviene ad esempio da una serie di raddrizzatori disposti a ponte. Lo schema del circuito di misura comprende pertanto: un motore coassiale con la dinamo, un amperometro in grado di misurare la corrente di eccitazione, e un voltmetro, derivato tra le spazzole della dinamo (fig. 36).

L'andamento pratico della prova si può così riassumere: dopo aver avviato la dinamo completamente diseccitata, si esegue una prima lettura al voltmetro per rilevare la f.e.m. dovuta al magnetismo residuo, indi si aumenta gradatamente la corrente di eccitazione da 0 fino al suo valore massimo (0,15 A nel nostro caso) rilevando contemporaneamente i valori corrispondenti della f.e.m. ai morsetti della dinamo (v. Tabella).

N.	Amperometro I_{ecc} andata			Voltmetro V_0			Amperometro I_{ecc} ritorno			Voltmetro V_0		
	δ	k	I	δ	k	I	δ	k	I	δ	k	I
	div.	A/div.	A	div.	V/div.	V	div.	A/div.	A	div.	V/div.	V
1	0	0,1	0	1,2	10	12	1,5	0,1	0,15	24,3	10	243
2	0,1		0,01	2,0		20	1,4		0,14	23,1		231
3	0,2		0,02	3,4		34	1,3		0,13	21,7		217
4	0,3		0,03	4,6		46	1,2		0,12	20,3		203
5	0,4		0,04	6,3		63	1,1		0,11	19		190
6	0,5		0,09	8,0		80	1		0,1	17,4		174
7	0,6		0,06	9,6		96	0,9		0,09	15,9		159
8	0		0,07	11,7		117	0,8		0,08	14,3		143
9	0,8		0,08	13,2		132	0,7		0,07	12,6		126
10	0,9		0,09	14,9		149	0,6		0,06	10,7		107
11	1		0,11	16,4		164	0,5		0,05	9,2		92
12	1,1		0,11	18,0		180	0,4		0,04	7,5		75
13	1,2		0,12	19,7		197	0,3		0,03	5,1		61
14	1,3		0,13	21,2		212	0,2		0,02	3,8		38
15	1,4		0,14	22,7		227	0,1		0,01	2,4		24
16	1,5	↓	0,15	24,3	↓	243	0	↓	0	1,2	↓	12

Note: La V_0 coincide praticamente con la f.e.m. **E** della dinamo poichè la corrente erogata è praticamente trascurabile.

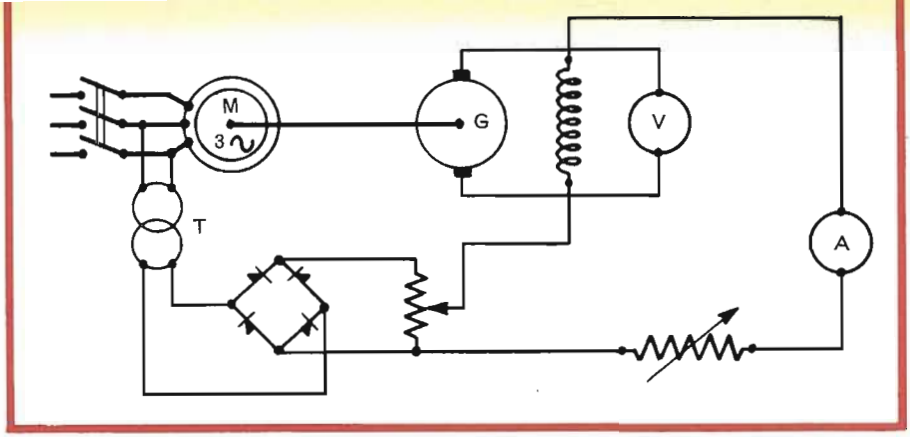


Fig. 36 - Disposizione schematica per il rilievo della caratteristica di magnetizzazione.

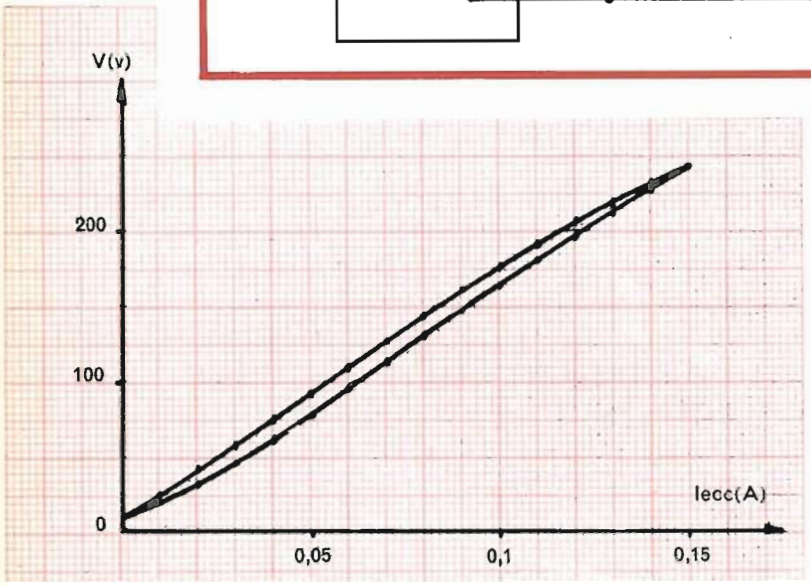


Fig. 37 - Diagramma magnetizzazione.

I valori ricavati vengono poi posti nel diagramma (fig. 37).

Strumentazione

Voltmetro: VC6 Seb Milano; portata 300 V; Div. 30; 1000 Ω/V; strumento magnetoelettrico; classe 0,5 c.c.; quadrante da disporsi orizzontalmente; Mod. 2598; N. 680033.

Reostato: R 10.1 «Hochstbelastung»; N. P 95907; 0,6 A; 6000 Ω.

Raddrizzatore: «Pellizzari Arzignano»; 160 V continua; regolato per 0,85 A.

Trasformatore: 220 VA; 140 VA.

Amperometro: «Precision»; tipo magnetoelettrico; Mod. P2M; N. 11871; classe 0,5; corrente continua; tensione di prova 500 V; quadrante da disporsi orizzontalmente.

Cassetta distribuzione con reostato: V 110; $I = 0{,}15$ A.

Motore a corrente alternata trifase.

Dinamo: 220 V; 6,8 A; 1,5 kW.

Interruttore: Min. 42.

Esercizio 21

Taratura di un amperometro mediante potenziometro

L'impiego del potenziometro per le misure di precisione delle correnti si basa sul principio di misurare, anzichè la corrente, la caduta di tensione che essa determina in una resistenza campione inserita nel circuito percorso dalla corrente stessa (fig. 38).

Premesso ciò si rende possibile la taratura di un amperometro con un potenziometro, disponendo del circuito di misura schematizzato. Dopo aver campionato il potenziometro con un elemento Weston, vi si deriva il circuito di misura (in opposizione alla f.e.m. del potenziometro) e si rileva la caduta di tensione ai capi della resistenza R_c (nota) percorsa dalla corrente incognita I_x. Per la legge di Ohm la caduta V_{AB} varrà:

$$V_{AB} = R_c I_x.$$

Il valore numerico di V_{AB} viene letto direttamente sul potenziometro allorchè il galvanometro è in equilibrio; quindi avremo

$$I_x = \frac{V_{AB}}{R_c}.$$

Per facilitare la rilevazione sperimentale si può far uso di una resistenza campione di 1 Ohm per cui la caduta di tensione ai capi di essa è numericamente uguale alla corrente incognita che vi transita. Nell'eseguire la prova bisogna fare molta attenzione a non superare la corrente massima sopportabile dalla resistenza campione R_c.

Si sono ottenuti i seguenti valori tabellari:

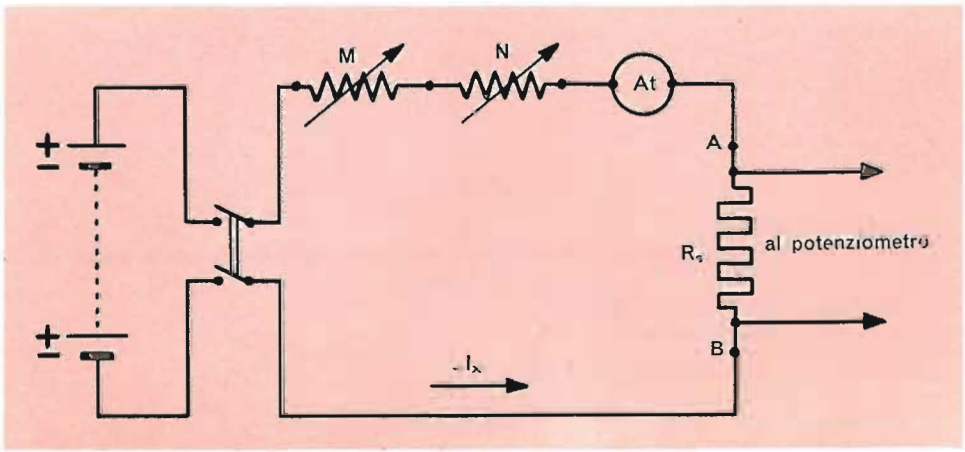


Fig. 38 - Schema di circuito per la taratura potenziometrica di un amperometro.

N.	Amperometro			Potenz.		Errore assoluto	Errore per cento
	δ	k	I_t	M+N	I	ε_a	$\varepsilon_p\%$
	div.	A/div.	A	Ω	A	A	=
1	5	0,1	0,5	0,509	0,509	—0,009	—1,7
2	4,5		0,45	0,46	0,46	—0,01	—2,1
3	4		0,4	0,4082	0,468	—0,0081	—1,7
4	3,5		0,35	0,356	0,356	—0,006	—1,6
5	3,0		0,3	0,3062	0,3062	—0,0062	—2
6	2,5		0,25	0,255	0,0255	—0,005	—1,9
7	2,0		0,2	0,2061	0,2061	—0,0061	—2,9
8	1,5		0,15	0,1542	0,1542	—0,0042	—2,8
9	1,0		0,1	0,102	0,102	—0,002	—1,9
9	1,0		0,1	0,102	0,102	—0,002	—1,9
10	0,5		0,05	0,051	0,051	—0,001	—1,9

Note:

$$\varepsilon_a = I_t - I. \qquad \varepsilon \cdot \% = \frac{\varepsilon_a}{I} \cdot 100.$$

È quindi possibile tracciare il diagramma che segue in fig. 39.

Strumentazione

Amperometro: AC14.

Galvanometro: G4 «Allocchio Bacchini e C.», Milano; tipo magneto-elettrico per c.c.

Interruttore: Min. 11, «Leybold» 504-45.

Potenziometro: a c.c. P21 Seb. Milano; Mod. PT/2; N. 658939.

Pila Weston: P.C.2, Seb, «Allocchio Bacchini»; N. 1596.

Resistenza campione: R.c. 15; 1 Ω internazionale a 10° C.

Fig. 39 - Diagramma di taratura.

Misura di resistenze di valore inferiore ad 1 Ohm col metodo del doppio ponte di Thompson

Lo scopo di questa esperienza è di calcolare, mediante l'uso di un doppio ponte di Thompson, il valore di una resistenza inferiore a 1 Ohm.

Da ricordare che in questo caso il ponte di Wheatstone non sarebbe utilizzabile, dato che si presta bene per misure di resistenze per valori compresi fra 1 e 10^6 ohm. Per calcolare R_x dobbiamo mettere in relazione i valori $R_1 R_2 R_c$ prescindendo dal valore della corrente (fig. 40).

Consideriamo infatti la maglia $ABCDA$; si ha:

$$R_1 I_1 - R_c I - R_1 I_2 = 0;$$

considerando invece la maglia $BCEFB$ si ottiene:

$$R_2 I_2 + R_x I - R_2 I_1 = 0.$$

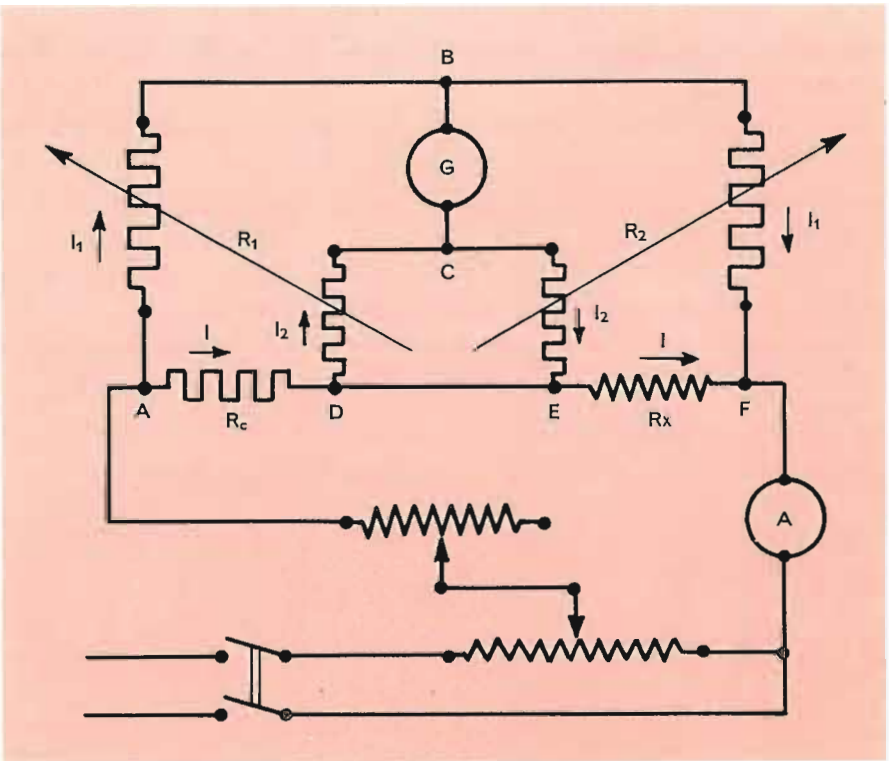


Fig. 40 - Schema di doppio ponte di Thompson.

Da queste espressioni si ricava:

$$R_c I = R_1(I_1 - I_2) \qquad R_x I = R_2(I_1 - I_2).$$

Dividendo membro a membro si ottiene:

$$\frac{R_c}{R_x} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Per quanto riguarda la pratica applicazione si farà in modo che dopo aver trovato teoricamente il valore della resistenza incognita si fissino valori opportuni al rapporto

$$\frac{R_1}{R_2}$$

in modo che il galvanometro G non segni alcun passaggio di corrente nelle condizioni di equilibrio.

Strumentazione

Galvanometro: «Kipp» GII.

Resistenza campione: «Manganin» 0,001 Ohm int. a 20°; Rc16.

Amperometro: «Precision» Milano; Mod. SGQ; N. 42198; 5 mA; 100 mV; Ac 4.

Reostato: «Seci» Milano; tipo 506/S; N. 14073; prestazione 28 Ohm; 5,5 A; R 03.

Reostato: «Seci» Milano; tipo 405/S; N. 6525; prestazione 140 Ohm; 2 A; 5R 15.

Si ottengono i valori indicati nella tabella che segue:

R_2	R_1	R_c	R_x	R_{xm}	Note
Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	
5,4	1	10^{-3}	$5{,}4 \cdot 10^{-3}$	$5{,}3593 \cdot 10^{-3}$	
53,4	10	10^{-3}	$5{,}34 \cdot 10^{-3}$		Cu
533,8	100	10^{-3}	$5{,}338 \cdot 10^{-3}$		
93,6	1	10^{-3}	0,936	0,936	Fe

Nota: Naturalmente i valori trovati dipendono non solo dalla resistività specifica del materiale ma anche dalla sua lunghezza e sezione.

Esercizio 23

Misura col metodo Barbagelata di un circuito trifase squilibrato e simmetrico

Lo scopo della prova è di eseguire misure di potenza su un circuito trifase squilibrato e simmetrico col metodo Barbagelata e conseguente deduzione del cos φ. Per misurare la potenza di un circuito trifase simmetrico ma squilibrato il metodo Aron cade in difetto; si ricorre allora al metodo Barbagelata che consiste nell'eseguire 4 misure di potenza con 2 wattmetri.

Questi si inseriscono come indicato nello schema (fig. 41) e si eseguono 2 coppie di letture una con il tasto T chiuso e una con T aperto.

Nel primo caso l'inserzione è quella Aron: si risale così alla $P_{tot} = P_{13} + P_{23}$.

Quando T è aperto le voltmetriche dei 2 wattmetri sono inserite sui fili 1,2; siccome sono in serie ed eguali fra di loro la v che agirà su di esse sarà $V_{12}/2$, cioè W_1 indica la potenza P_{12} e W_2 darà P_{21}.

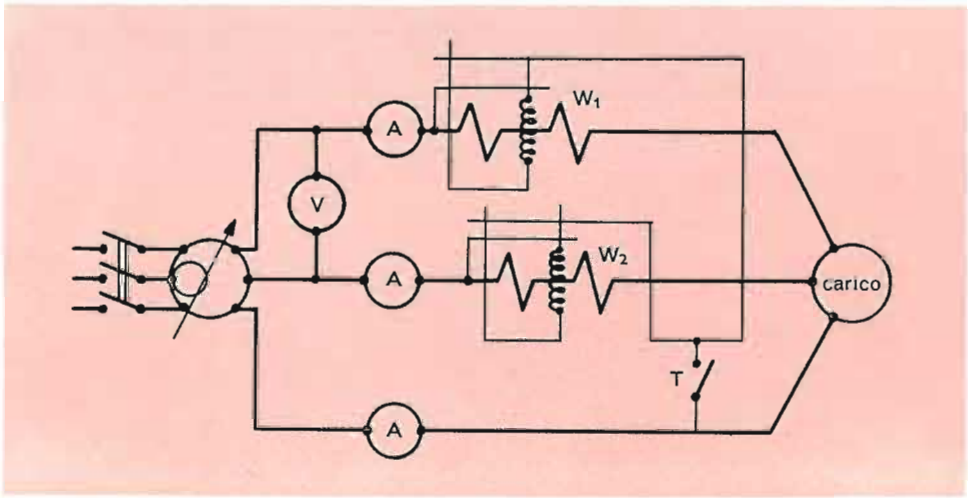


Fig. 41 - Schema di inserzione strumenti (metodo Barbagelata).

NB. I wattmetri sono dotati di dispositivo invertitore (per le voltmetriche) atto ad evitare lo scambiamento dei morsetti quando lo strumento tende a segnare valori negativi.

Strumentazione

Wattmetro: «Allocchio Bacchini»; Mod. 2989; N. 75583; tipo elettrodinamico; quadrante orizzontale; tensione di prova 2000 V; portata voltmetrica 150 Volt; portata amperometrica 10 A; Div. 150; $k = 10$ per c.a.; classe 1.

Amperometro: «Allocchio Bacchini»; Mod. 2154; N. 75604; quadrante orizzontale; tipo elettromagnetico; classe 1; per corrente continua e corrente alternata; tensione di prova 500 V; portata amperometrica 10 A; Div. 5; $k = 2$.

Voltmetro: VA3 «Norma» 1246470; 5000 Ω/V; quadrante orizzontale; tipo elettromagnetico; classe 1,5; tensione di prova 2000 V; Div. 100; portata 100 Volt; $k = 1$; per corrente continua e alternata.

Amperometro: AA5 «Precision» Milano; N. 210147; Mod. G.G.F.; quadrante verticale; tipo elettromagnetico; classe 2,5; per corrente continua ed alternata; tensione di prova 500 V; portata amperometrica 10 A; Div. 10; $k = 1$.

Amperometro: AA4 «Precision» Milano; N. 210146; Mod. G.G.F.; quadrante verticale; tipo elettromagnetico; per corrente continua ed alternata; classe 2,5; tensione di prova 500 V; portata amperometrica 10 A; Div. 10; $k = 1$.

Trasformatore trifase: $V_M = 280$ V; $P = 45$ VA.

Interruttore: min. 13.

Interruttore: tarato 20 A.

La tabella alla pagina seguente riassume i valori letti.

$\sqrt{}$	P_{13}			P_{23}			P	P_{12}			P_{21}			X	cos φ	I
Volt	δ div.	k watt div.	P watt	δ civ.	k watt div.	P watt	Watt ($P_{13}+P_{23}$)	δ div.	k watt div.	P watt	δ div.	k watt div.	P watt	$\frac{P_{23}+P_{31}+P_{12}}{P_{13}+P_{21}+P_{32}}$	$\frac{x+1}{2\sqrt{x^2-x+1}}$	$\frac{P}{\sqrt{3}\cos\varphi V}$ Amp.
10	1,8	10	18	— 0,3	10	— 3	15	0,1	20	2	0,2	20	4	0,2857	0,715	1,224
20	5,8		58	— 1,6		— 16	42	1,2		24	1,65		33	0,2463	0,685	1,77
30	11,9		119	— 2,8		— 28	91	2,4		48	3,4		68	0,1872	0,64	2,74
40	21,9		219	— 5,7		— 57	162	4,2		84	5,7		114	0,2043	0,655	3,58
50	32,85		328,5	— 7,8		— 78	250,5	6,65		133	8,5		170	0,2195	0,667	4,33
60	47,45		474,5	—10,8		—108	366,5	9,35		187	12,1		242	0,2258	0,675	5,22
70	62	↓	620	—14,1	↓	—141	479	12	↓	240	16,4	↓	328	0,23	0,678	5,84

Note:

$$P_{31} = P - P_{21} \qquad P_{32} = P - P_{12} \qquad x = \frac{P_{23} + P_{31} + P_{12}}{P_{13} + P_{21} + P_{32}} = \frac{P_{23} + P - P_{21} + P_{12}}{P_{13} + P_{21} + P - P_{12}}$$

Esercizio 24

Prove su un trasformatore monofase: a vuoto, in corto circuito e di rapporto

La modalità delle prove segue il criterio normalmente in uso per la esecuzione di misure di carattere industriale e si uniforma ai criteri delle norme prescritte dal Comitato Elettrotecnico Italiano.

Strumentazione

Variatori di tensione: Marca HB.

Amperometro: HB; matricola 307373; f.s. 50 A.

Amperometro: HB; matricola 307353; f.s. 1 A.

Wattmetro: HB; matricola 305971.

Resistenza addizionale per il Wattmetro.

Voltmetro: SH 3236338; f.s. 0,1 Volt.

Amperometro: SH 3062999; f.s. 1 A.

Caratteristiche di targa del trasformatore: «Gedda-Brioschi-Finzi»; 170 V/225 V; kVA 5.

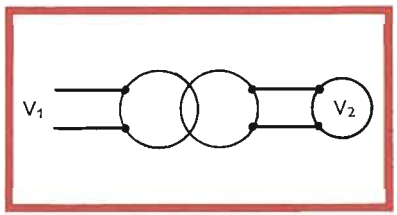


Fig. 42 - Schema di prova rapporto di un trasformatore monofase.

Misura delle resistenze

La prova viene eseguita a macchina fredda, dopo un periodo di inattività sufficiente per far ritenere che la temperatura degli avvolgimenti sia eguale a quella dell'ambiente o meglio a quella indicata da un termometro infilato fra gli avvolgimenti.

La resistenza degli avvolgimenti viene misurata fra i morsetti con il metodo della caduta di tensione.

I valori che seguono sono stati letti alla temperatura di 19,6 °C (fig. 42).

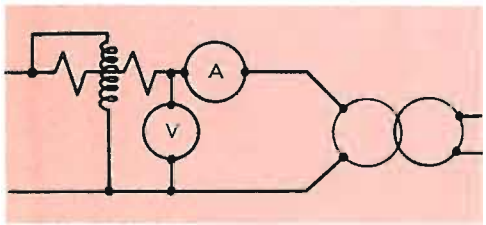


Fig. 43 - Schema di inserzione per la prova a vuoto di un trasformatore.

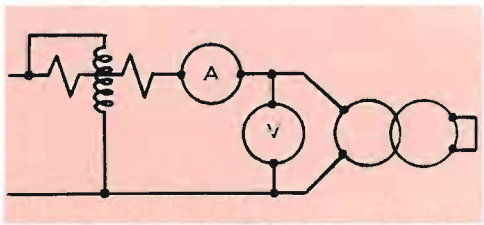


Fig. 44 - Schema di inserzione per la prova in corto circuito di un trasformatore.

N.	V K = 0,1	A K = 1	R	Morsetti
1	2,28	0,85	0,268	alta tensione
2	5,11	1,92	0,267	alta tensione
3	8,21	3,05	0,269	alta tensione
4	1,20	0,85	0,142	bassa tensione
5	2,86	1,96	0,142	bassa tensione
6	4,91	3,48	0,141	bassa tensione

Dalla tabella che precede possiamo ricavare le seguenti conclusioni a 75 °C. Resistenza primario:

$$R_1 = R\left(1 + \frac{1}{234,5}(75^{o} - 29,6)\right) = 0,332 \text{ Ohm.}$$

Resistenza secondario:

$$R_{//} = 0,142 \cdot 1.236 = 0,175 \text{ Ohm.}$$

Resistenza ohmica equivalente al primario a 75 °C:

$$R_s = R_1 + K_0^2 R_{//} = 0,332 + (1.324)^2 \cdot 0,175 = 0,639 \text{ Ohm,}$$

dove K_0 è il rapporto di trasformazione a vuoto.

Prova a vuoto (fig. 45)

Scopo della prova è la determinazione delle perdite nel ferro (per isteresi e per correnti parassite). Il trasformatore è stato alimentato dal lato bassa tensione tramite un variatore di tensione, regolato fra 80 e 200 V (fig. 43).

I valori ricavati figurano sulla tabella che segue:

N.	V_0 K = 2	V Volt	I_0 K = 1	W_0 K = 1	cos φ
1	40	80	0,423	23	0,68
2	50	100	0,490	34	0,69
3	60	120	0,555	45,7	0,695
4	70	140	0,625	60	0,684
5	80	160	0,682	74	0,679
6	85	170	0,715	81	0,675
7	90	180	0,750	91,3	0,676
8	100	200	0,825	110,0	0,666

Da questa tabella è possibile tracciare il diagramma di fig. 45.

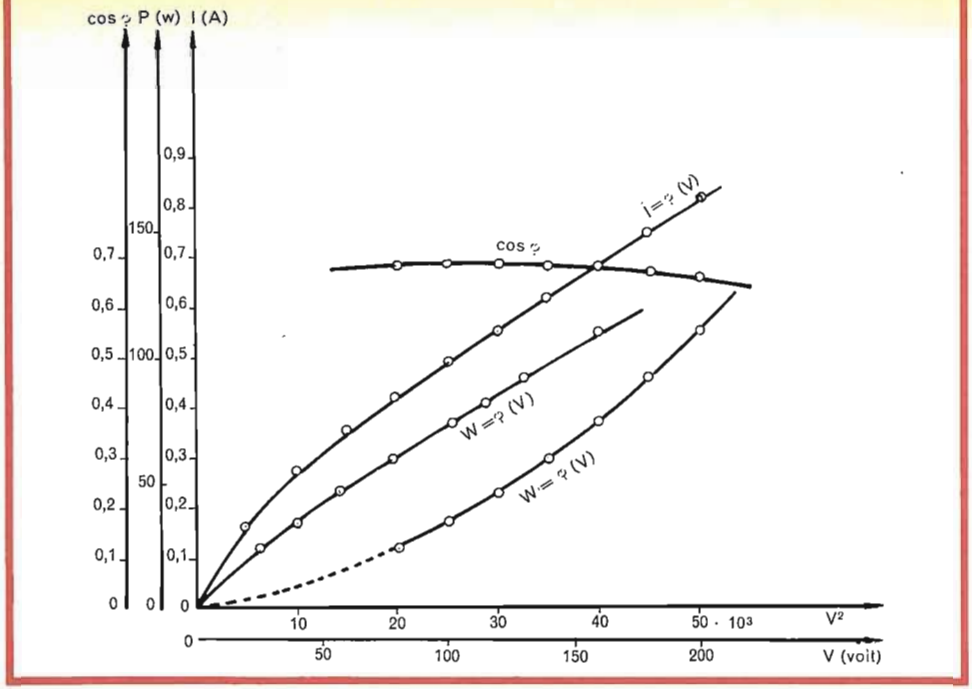


Fig. 45 - Diagrammi prova a vuoto di un trasformatore.

Dalla serie delle letture eseguite alla temperatura di 20,6 °C si deducono i seguenti valori:

Tensione ai morsetti: $V_0 = 170$ V;

Potenza assorbita: $P_0 = 82$ W;

Fattore di potenza: $\cos \varphi = 0{,}675$;

Corrente media assorbita: $I_0 = 0{,}715$ A.

Corrente media assorbita in % della corrente normale: $a = \frac{I_0}{I} =$

$$= 100 \frac{0{,}715}{29{,}4} = 2{,}43\% \qquad \varphi_0 = 47^{\circ}\,30'.$$

Prova in corto circuito (fig. 46)

Scopo della prova è la determinazione della perdita nel rame data dalla potenza misurata dal wattmetro.

Il trasformatore viene alimentato dal lato alta tensione, con tensione ridotta variabile da zero ad un valore tale che la corrente non superi il valore normale

$$I = 5000 : 225 = 22{,}2 \text{ A}.$$

Dalla lettura agli strumenti e dai relativi calcoli è possibile eseguire la tabella che segue:

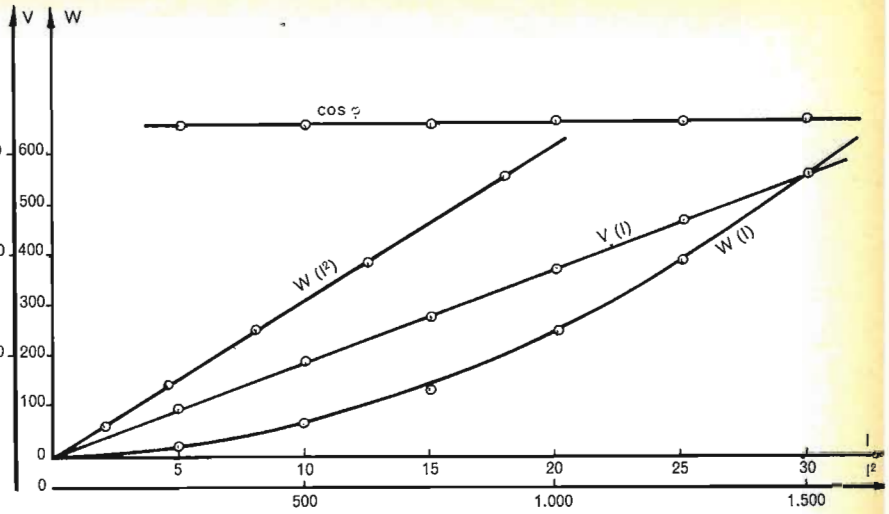


Fig. 46 - Diagrammi prova in corto circuito di un trasformatore.

N.	I_{cc} K=	V_{cc} K=	V_{cc} Volt	W_{cc} K= 5	W_{cc} Watt	cos φ cc	senφ cc	R_{cc} =	Z_{cc} =	X_{cc} =	X_{cc} =
1	5	44	4,4	2,9	14,5	0,659	0,751	0,580	0,880	0,651	0,662
2	10	89,1	8,91	11,1	55,5	0,624	0,780	0,555	0,891	0,695	0,696
3	15	134	13,4	25,2	126	0,627	0,778	0,560	0,893	0,695	06,95
4	20	93	18,6	49,5	247,5	0,665	0,747	0,619	0,930	0,695	0,694
5	25	116,2	23,2	77,0	385	0,662	0,749	0,615	0,930	0,697	0,697
6	30	140,1	28,2	112,4	562	0,665	0,747	0,625	0,940	0,701	0,702

Da questa tabella si traccia il diagramma di fig. 46.

Infine utilizzando i diagrammi delle figg. 45 e 46 si può tracciare il diagramma del rendimento e della potenza perduta (fig. 47).

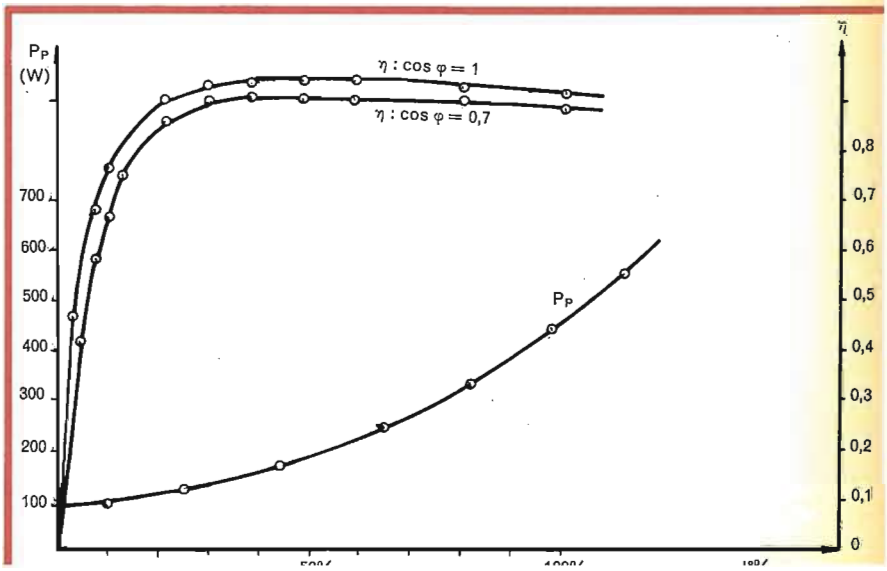


Fig. 47 - Diagrammi rendimento e potenza persa.

Esercizio 25

Prova a vuoto - prova in corto circuito - prova di rapporto di un trasformatore trifase

Strumentazione

Trasformatore: «Tomasetti»; N. I1001; 5 kVA; spire 110; 50 Hz; 220 V/380 V; collegamento triangolo-stella.

TA «Tomasetti»: rapporto 20/5.

TV «Tomasetti»: tipo 2; N. A468; classe P/25; rapporto 600/100; 50 Hz.

Wattmetro: C.G.S. (P_{32}, P_{31}); Tipo H1K18T; N. 995076; portate amperometriche 5 A - 10 A; portate voltmetriche 75 V - 150 V; tipo elettrodinamico; classe 0,5; per c.a.; quadrante orizzontale; tensione di prova 2000 V.

Wattmetro: C.G.S. (P_{12}, P_{13}); Tipo H1K18T; portata amperometrica 5 A - 10 A; portata voltmetrica 75 V - 150 V.

Amperometro: «Allocchio Bacchini»; Mod. 2154; N. 75604.

Voltmetro: «Norma»; Mod. P.F.S.; N. 1146470; portata 100 V; classe 1,5; per corrente alternata; tipo magnetoelettrico con raddrizzatore; tensione di prova 2000 V; quadrante orizzontale.

Voltmetro: «Precision» Milano; Mod. P2F; N. 11841; portata 75 V; classe 0,5; per corrente alternata; tipo elettromagnetico; classe di precisione 0,5; tensione di prova 2000 V.

Interruttore: «Leybold»; N. 50445.

Variac SD: N. 3066, 220 V, 50 Hz, *In* 17 A, *Imax* 191 A, tipo 20.

a) prova a vuoto

V_1 volt	P_{12} watt	P_{32} watt	P_{13} watt	P_{31} watt	V_{20} volt	$P_0 = P_{12} + P_{32}$ watt	$k = \frac{V_1}{V_2}$	x	cos φ_0	I_0 Amp.
20	0	25	40	20	129	25	0,155	0,0714	0,565	1,275
30	— 9	60	100	30	196,	51	0,152	— 0,1545	0,390	2,53
40	—65	155	244	— 20	266,4	90	0,152	— 0,470	0,205	6,34
50	—90	520	820	—242	348	430	0,144	— 0,360	0,265	18,5

b) **prova in corto circuito**

I_{2k} Amp.	I_{1k} Amp.	$k = \frac{I_{2k}}{I_{1k}}$	V_k volt	P_{12} watt	P_{32} vatt	$P_k = P_{12} + P_{32}$ watt	$x = \frac{P_{12}}{P_{32}}$	cos φ
4	24	0-167	12,50	31,5	45	76,5	0,700	0,356
6	33,6	0,178	19,25	70	102,5	172,5	0,680	0,344
8	45,6	0,175	26,00	125	185	310,0	0,675	0,942
10	59,52	0,168	33,75	202,5	285	487,5	0,710	0,960
12	71,52	0,168	40,50	297,5	445	742,5	0,668	0,339

Le prove che si possono eseguire sui trasformatori hanno essenzialmente per oggetto: *a*) la misura del rapporto di trasformazione a vuoto; *b*) la determinazione delle cadute di tensione da vuoto a carico; *c*) la determinazione delle perdite e dei rendimenti. Per queste determinazioni, salvo la misura del rapporto a vuoto, si applicano quasi esclusivamente i metodi indiretti: i rendimenti dei trasformatori sono infatti così elevati che la differenza fra la potenza assorbita al primario e quella resa al secondario può facilmente risultare dello stesso ordine di grandezza degli inevitabili errori strumentali e di lettura; la determinazione del rendimento in base alla misura diretta di queste due potenze può in tal caso far pervenire a dei risultati palesemente assurdi. Il rilievo sperimentale delle caratteristiche di funzionamento dei trasformatori si esegue quindi in base ai risultati della prova a vuoto e della prova in corto circuito, (fig. 48 e fig. 49).

Prova di rapporto. Il rapporto di trasformazione a vuoto di un trasformatore mette in relazione la tensione nominale primaria V_1 con la corrispondente tensione V_{20} misurata fra i morsetti secondari aperti: per i trasformatori monofasi questo rapporto coincide praticamente col

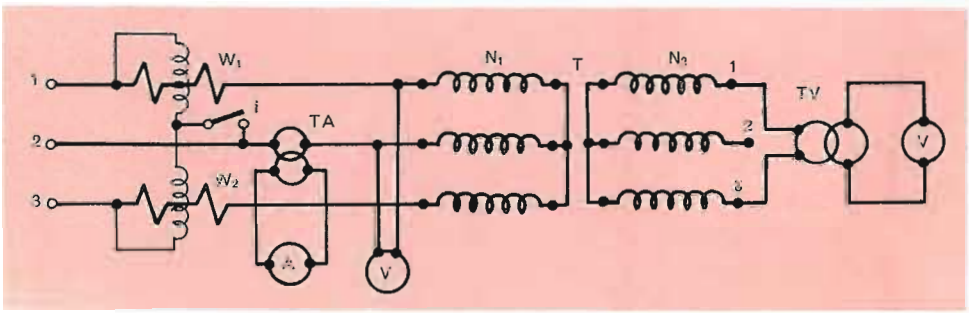


Fig. 48 - Schema di inserzione per prova a vuoto di un trasformatore trifase.

rapporto k fra i numeri delle spire dei due avvolgimenti (rapporto spire) e si scrive perciò:

$$\frac{V_1}{V_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = k\,.$$

Per i trasformatori trifase la stessa relazione sussiste in ogni caso per le singole colonne, e cioè per le tensioni di fase; se invece si considerano le tensioni ai morsetti occorre tener conto dello schema delle connessioni fra le singole fasi. Per il collegamento stella/stella o triangolo/triangolo la relazione sopra scritta rimane invariata; per il collegamento triangolo/stella si ha:

$$\frac{V_1}{V_{20}} = \frac{m}{\sqrt{3}},$$

con

$$m = \frac{N_1}{N_2};$$

mentre per il collegamento stella/triangolo si ha:

$$\frac{V_1}{V_{20}} = m\sqrt{3}.$$

Il metodo più semplice per la misura del rapporto a vuoto è fornito dalla misura diretta delle tensioni primaria e secondaria a vuoto mediante due voltmetri derivati ai morsetti (fig. 48).

Un altro metodo per la determinazione del rapporto in corto circuito è quello dei due amperometri, applicati a misurare rispettivamente la corrente primaria e secondaria, I_1 e I_{2k}, nel funzionamento del trasformatore in corto circuito (fig. 49). Infatti quando il trasformatore lavora in corto circuito sia la f.e.m. primaria che la secondaria risultano molto piccole rispetto ai valori normali, e perciò anche il flusso del nucleo è assai piccolo, dal

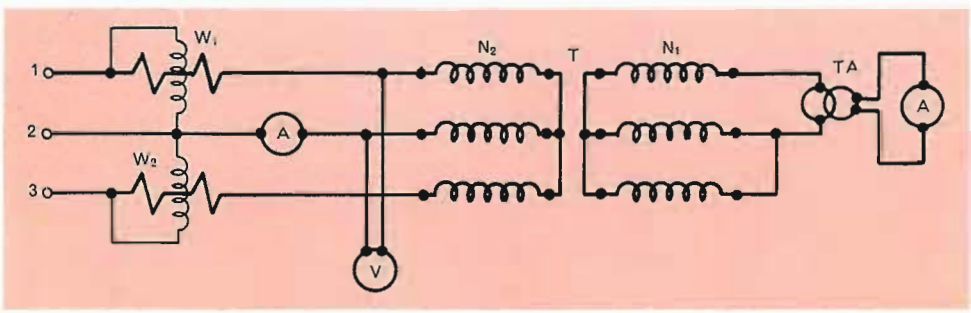


Fig. 49 - Schema di inserzione per prova in corto circuito di un trasformatore trifase.

2 al 5% del flusso normale. Ne consegue che anche la f.m.m. necessaria per produrlo è minima, e quindi praticamente $N_1 I_{1k} = N_2 I_{2k}$, ossia senza errore sensibile si può scrivere

$$\frac{I_{2k}}{I_{1k}} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Nella nostra prova il valore di k è stato determinato con entrambi i metodi, ed è risultato circa 0,16.

Prova a vuoto (fig. 48). La prova a vuoto dei trasformatori si effettua alimentando indifferentemente l'uno o l'altro dei due avvolgimenti *A.T.* o *B.T.* alla rispettiva tensione nominale, mantenendo l'altro avvolgimento a circuito aperto; nel nostro caso si è trovato più comodo alimentare l'avvolgimento a minor numero di spire N_1. Questa prova ha lo scopo di determinare la corrente a vuoto I_0, il rispettivo fattore di potenza cos φ_0 e la potenza assorbita P_0; quest'ultima rappresenta le perdite a vuoto del trasformatore, le quali si identificano praticamente con le perdite a carico dovute a isteresi e correnti parassite nel nucleo. Infatti le perdite joule sono, a pieno carico, sufficientemente basse perchè diventino trascurabili a vuoto, quando la corrente è circa il 10% della corrente a pieno carico, e quindi P_0 rappresenta senz'altro le perdite nel ferro a vuoto. Sempre perchè le perdite joule a vuoto sono piccole, il flusso creato a vuoto e a carico applicando una certa tensione V_1 sarà circa uguale, e la I_m non varierà apprezzabilmente. È per questo che le perdite magnetiche a vuoto e a pieno carico sono praticamente uguali.

La prova ha avuto inizio con una tensione notevolmente inferiore al valore nominale per aumentarla fino a superare tale valore. Si sono potute così rilevare le curve di P_0, I_0 e cos φ_0 in funzione della tensione di alimentazione:

$$I_0 = \frac{I_{10} + I_{20} + I_{30}}{3}.$$

La prova deve essere eseguita alla frequenza normale di esercizio, ed è indispensabile che la tensione di prova presenti una forma d'onda praticamente sinusoidale; poichè le correnti a vuoto sono invece fortemente deformate per la presenza di una armonia di 3° ordine, si deve escludere impiego di reostati in serie con la linea di alimentazione; la regolazione della tensione è stata eseguita con un variac.

Nei trasformatori trifasi, in conseguenza della dissimmetria del nucleo la corrente a vuoto relativa alla colonna centrale risulta alquanto minore delle altre due. Per questo due wattmetri inseriti in Aron danno, con la somma algebrica dei valori da essi segnati, la potenza attiva, ma non permettono il calcolo del cos φ. È stato perciò usato il metodo Barbagelata, o delle quattro letture, realizzabile con due soli wattmetri, con le

bobine amperometriche inserite in serie sulle fasi 1 e 3 e le bobine voltmetriche collegate prima fra loro e poi, attraverso un interruttore I, alla fase 2. Con l'interruttore I chiuso si eseguono le prime 2 letture, P_{12} e P_{32}, indi si apre I e si eseguono le ultime 2 letture, P_{13} e P_{31}, tenendo conto che ora la costante dei wattmetri risulta raddoppiata perchè un circuito voltmetrico funziona come resistenza addizionale per l'altro (nell'ipotesi di usare 2 wattmetri uguali). Si ha che

$$P_0 = P_{12} + P_{32}, \qquad P_{21} = P_0 - P_{31};$$

$$X = \frac{P_{12} + P_{23} + P_{31}}{P_{21} + P_{32} + P_{13}}$$

$$P_{23} = P_0 - P_{13}.$$

Dalla x si ricava il cos φ attraverso il grafico, oppure con la relazione:

$$\cos \varphi = \frac{1 + x}{2\sqrt{1 - x + x^2}}.$$

La corrente media I_0 si calcola usando la solita formula

$$I_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}\ V_0 \cos \varphi_0}.$$

Vedi il diagramma di fig. 50.

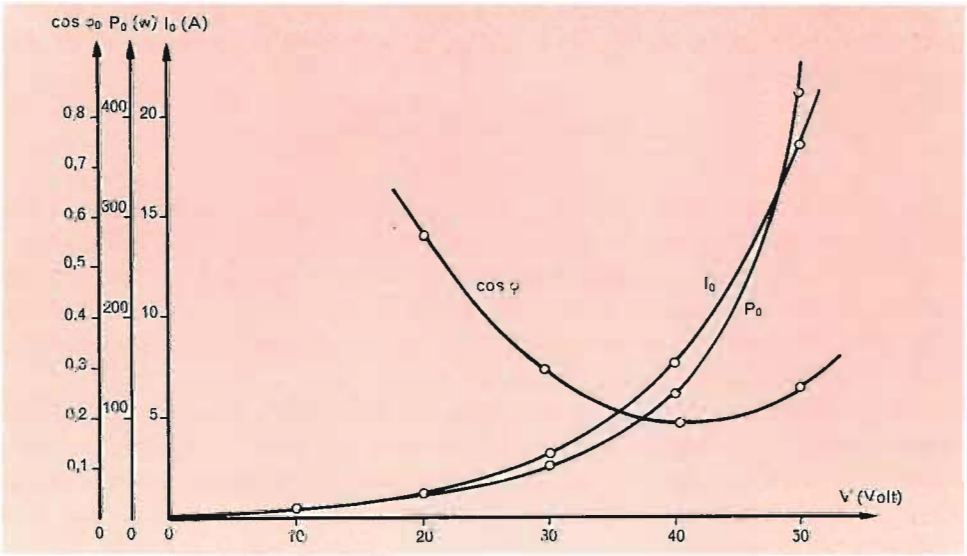


Fig. 50 - Diagramma della resa a vuoto di un trasformatore trifase.

Prova in corto circuito (fig. 49). La prova in corto circuito di un trasformatore si effettua chiudendo uno dei due avvolgimenti in corto circuito e alimentando l'altro con una tensione regolabile a partire da 0 fino a far circolare negli avvolgimenti stessi le rispettive correnti nominali: la tensione che si richiede a tal fine può essere dell'ordine dal 4 al 10% della tensione nominale dell'avvolgimento su cui si effettua l'alimentazione (alta tensione nel nostro caso) e costituisce la tensione di corto circuito del trasformatore. Data la piccola tensione applicata nel funzionamento in corto circuito del trasformatore, la corrente magnetizzante, il flusso nel nucleo e le perdite corrispondenti sono evidentemente trascurabili: l'intera potenza assorbita corrisponde perciò alle sole perdite nel rame dei due avvolgimenti, dei quali si può in tal modo determinare la resistenza equivalente complessiva; d'altra parte, essendo necessariamente nulla la tensione ai morsetti secondari chiusi in corto circuito, l'intera tensione applicata ai morsetti primari corrisponde alle sole cadute di tensione interne dei due avvolgimenti; in base alla tensione di corto circuito si può così calcolare l'impedenza equivalente del trasformatore, che permette a sua volta di determinare le variazioni della tensione secondaria che si verificano nel passaggio da vuoto a carico del trasformatore stesso.

In ogni caso la prova deve essere eseguita alla frequenza nominale di esercizio. Nel circuito primario vi sono un voltmetro, un amperometro e due wattmetri in inserzione Aron, che ci danno P_{12} e P_{32}, e quindi $P_A = P_{12} + P_{32}$, e il cos φ, dalla:

$$\varkappa = \frac{P_{12}}{P_{32}} \frac{\text{(lettura minore)}}{\text{(lettura maggiore)}},$$

(il carico è ora equilibrato). Il secondario è circuitato da cavi di grossa sezione, onde ridurre al minimo le perdite joule esterne al trasformatore, uno dei quali passa attraverso un TA, ai capi del quale è derivato un amperometro.

Sono state eseguite diverse determinazioni a tensione gradualmente crescente, per costruire le curve $P_k = f(I_k)$, $V_k = f(I_k)$, cos $\varphi_k = f(I_k)$ (fig. 51); la prima curva è risultata parabolica, in quanto la potenza di corto circuito cresce proporzionalmente al quadrato della corrente, la seconda lineare uscente dall'origine, perchè l'impedenza del trasformatore si mantiene praticamente costante.

Calcolo del rendimento. I valori nominali di tensione e corrente al secondario sono:

41 V e 55 A.

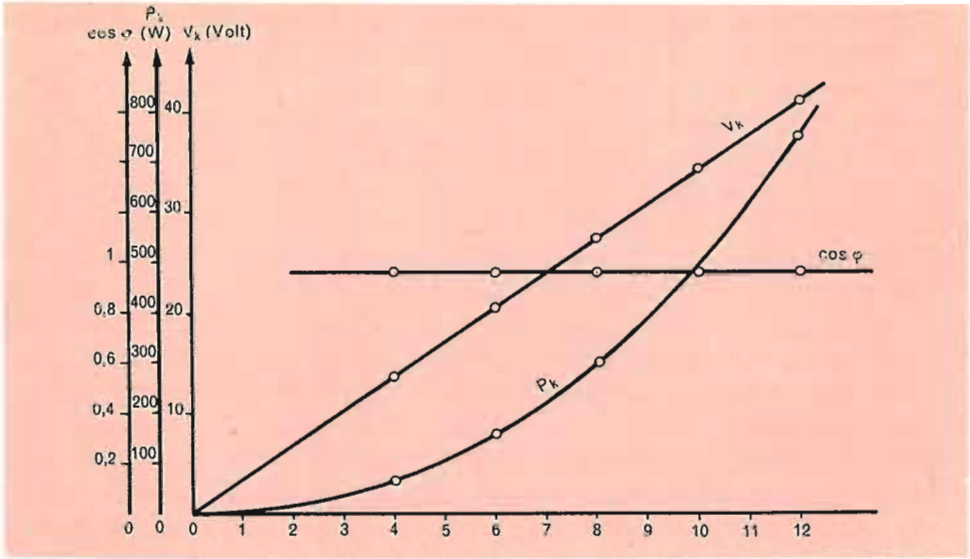


Fig. 51 - Diagramma delle prove in c.c. di un trasformatore trifase.

Dai grafici si ricava: la potenza perduta in corto circuito P_k con il valore di corrente nominale, che ci dà le perdite nel rame, la potenza perduta a vuoto P_0 con il valore nominale di tensione, che ci dà le perdite del ferro; la potenza totale perduta è quindi:

$$P_p = P_0 + P_k = 95 + 420 = 515 \text{ W},$$

somma delle perdite nel ferro P_0 e delle perdite nel rame P_k.

La potenza resa è $P_r = V_{2n} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{2n} = 41 \cdot 55 \cdot \sqrt{3} = 4.000$ W.

Il rendimento è quindi:

$$\eta = 1 - \frac{P_p}{P_r} = 1 - \frac{515}{4000} = 0{,}877.$$

Esercizio 26

Prove a vuoto e a rotore bloccato di un motore asincrono trifase con indotto a gabbia e deduzione del diagramma circolare

La grande importanza pratica dei motori asincroni rende particolarmente interessante la conoscenza del loro comportamento in diverse condizioni di carico, per quanto riguarda le varie grandezze interessanti la macchina (rendimento, fattore di potenza, coppia motrice, scorrimento).

Le caratteristiche di funzionamento dei motori asincroni trovano una completa rappresentazione in un *diagramma circolare* (o diagramma di

Heyland) che costituisce il luogo geometrico degli estremi dei vettori rappresentativi delle correnti assorbite, a tensione e frequenza costanti, in tutte le possibili condizioni di carico.

Questo diagramma può essere completamente definito mediante una *prova a vuoto* del motore ed una prova di *corto circuito*, le quali permettono di individuare insieme due punti del cerchio ed il centro del diagramma circolare. La f.e.m. indotta nel rotore di un motore asincrono è funzione del suo scorrimento s secondo la formula

$$E_{2s} = E_2 \cdot s,$$

in cui E_2 è la f.e.m. quando $s = 1$. La f.e.m. indotta si calcola in base alla seconda legge di Faraday

$$e = \frac{-d\Phi}{dt}$$

e quindi la f.e.m. applicata ai conduttori del rotore è chiaramente dipendente dalla differenza di velocità tra campo statorico e rotore.

Poichè:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_2} = \frac{sE_2}{R_2 + jsx}, \qquad \text{si ha che} \qquad I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jx_2}.$$

La corrente che si stabilisce in un circuito dotato di resistenza e di induttanza costanti, alimentato con una tensione proporzionale alla frequenza, è la stessa che si stabilisce in un circuito alimentato a tensione e a frequenza costante e di resistenza variabile in ragione inversa alla frequenza. Si possono quindi studiare le correnti che si stabiliscono nel rotore del motore asincrono come se esso fosse fermo e il suo circuito fosse chiuso sopra una resistenza esterna di valore:

$$R_{2e} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \frac{1 - s}{s},$$

in cui R_2 è la parte fissa della resistenza.

Si è così ricondotto lo studio del motore a quello del trasformatore avente al secondario un carico ohmico variabile.

In ogni condizione di esercizio (caratterizzata dal parametro s) la corrente di statore (primario) sarà espressa dalla risultante I_1 della corrente a vuoto I_0 e della corrente secondaria ridotta al primario I_{12} e cambiata di segno:

$$I_1 = I_0 - I_{12}, \qquad \text{in cui} \qquad I_{12} = I_2 \frac{K_2 N_2}{K_1 N_1},$$

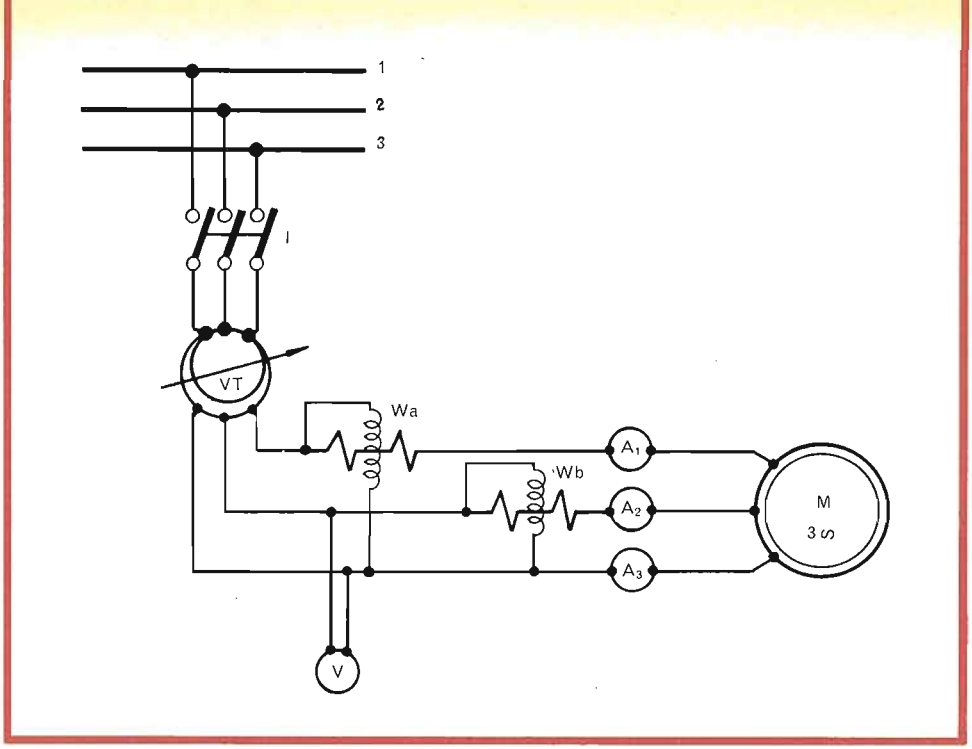


Fig. 52 - Schema di collaudo di un motore asincrono.

ove i K rappresentano i coefficienti di avvolgimento secondario e primario.

Il circuito equivalente del motore asincrono è quindi quello in fig. 52.

Poichè I_0 è quasi costante, cioè non varia sensibilmente al variare del carico, e poichè la caduta di tensione prodotta da I_0 attraverso l'impedenza del primario è in genere trascurabile, si potrà sostituire al circuito di fig. 53 quello di fig. 54.

Ci si trova quindi di fronte a un circuito alimentato a *tensione costante*, con $\varkappa$ costante e R variabile. Si costruisce quindi il grafico di fig. 55 per rappresentare le correnti in funzione delle resistenze, e quindi del cos φ dato che $\varkappa =$ cost. Ricordando la proprietà geometrica che ci dice che l'inverso di un cerchio è sempre un cerchio, di raggio infinito o finito, se sulla retta Z (fig. 26/4) (cerchio di raggio infinito) giacciono gli estremi dei vettori rappresentanti l'impedenza, sul cerchio opposto y di diametro

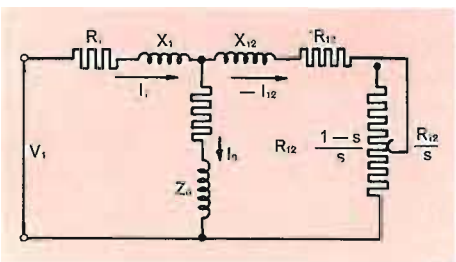


Fig. 53 - Circuito fittizio.

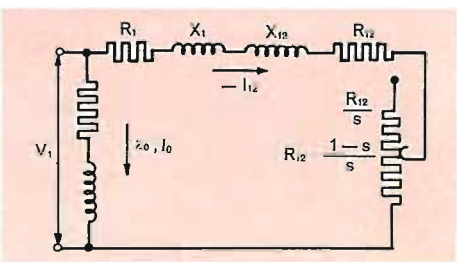


Fig. 54 - Circuito fittizio.

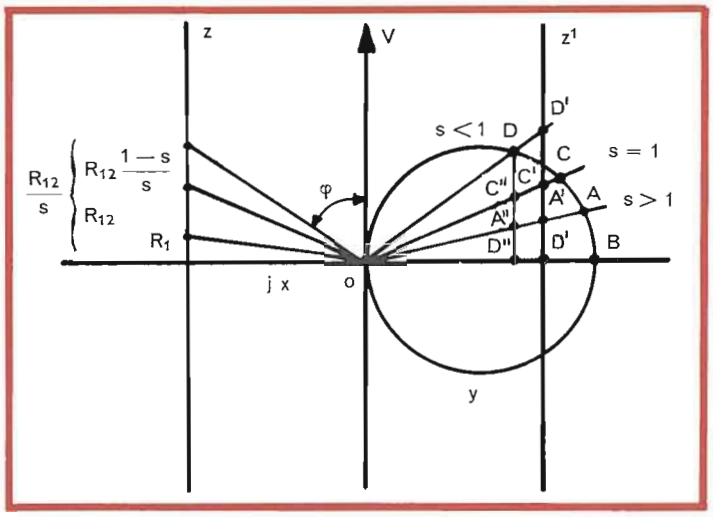


Fig. 55 - Grafico dimostrativo della proprietà geometrica.

$OB = 1/JX$ (ricordiamo che $1/J = -J$) giaceranno gli estremi dei vettori rappresentanti le ammettenze, e quindi le correnti ad esse proporzionali.

In tal modo si ha che:

$$\overline{OB} \cdot \overline{OB'} = \overline{OA} \cdot \overline{OA'} = \overline{OC} \cdot \overline{OC'} = \overline{OD} \cdot \overline{OD'} = 1,$$

come richiesto dalle condizioni di inversione, cioè $OB/OA = OA'/OB'$ e così via. Per comodità è stata riportata la retta ζ nel semipiano positivo (retta ζ') per rendere più agevole il confronto dei punti con i propri inversi. Quindi volendo trovare l'inverso della resistenza globale segnata dal valore $\overline{B'D'}$ sulla ζ', tracceremo il segmento $\overline{OD'}$ che incontra la circonferenza nel punto D. Il segmento $\overline{B''D}$ viene diviso in parti proporzionali alle ammettenze dei segmenti $\overline{OC'}$ e $\overline{OB'}$.

L'area di funzionamento del motore asincrono è quella compresa fra $\overline{OC}$ e l'arco di circonferenza $\overline{ODC}$ in quanto in C si ha scorrimento 1. Essendo il motore fermo si ha:

$$R = R_{12} + R_1.$$

Dal diagramma circolare, si possono ricavare P_a, P_r, s, cos φ, η e la coppia in funzione della corrente (fig. 56).

La prova a vuoto consiste nel far funzionare il motore a vuoto, alla tensione e frequenza normali di esercizio V e f, per misurarne la potenza e la corrente assorbite P_0 e I_0, in base alle quali resta anche determinato cos φ_0.

Lo stato di funzionamento in corto circuito del motore asincrono corrisponde alla condizione $s = 1$ e si realizza mantenendo il rotore immobile. In queste condizioni il motore si comporta come un trasformatore ordinario.

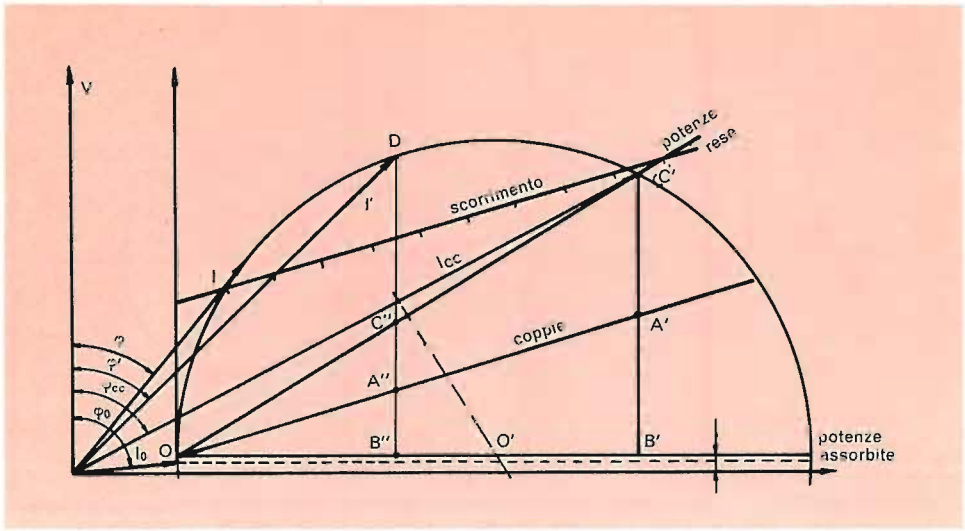


Fig. 56 - Diagramma circolare.

Conseguentemente la prova di corto circuito di un motore asincrono consiste nella determinazione della potenza e della corrente che esso assorbe quando si alimenta il primario alla frequenza nominale col rotore bloccato e chiuso in corto circuito (quest'ultima condizione è sempre realizzata nei motori con rotore a gabbia); per non avere negli avvolgimenti correnti eccessive, la prova deve essere eseguita, come per i trasformatori, a tensione ridotta V'_{cc}. Considerando V e I direttamente proporzionali, si calcola la I_{cc} che circolerebbe con la tensione nominale; nel caso in esame $V'_{cc} : I'_{cc} = 220 : I_{cc}$.

Calcolato con la potenza il cos φ_{cc}, si riporta anche la I_{cc} in diagramma (fig. 56). Si traccia la $\overline{I_0 I_{cc}}$, indi la semicirconferenza definita dai due estremi di I_0 e I_{cc} e con centro sulla orizzontale passante per l'estremo di I_0 (in realtà, il diametro del cerchio viene leggermente spostato verso l'alto per poter tener conto delle perdite a vuoto e nel contempo lasciare al motore una piccola coppia sufficiente per muoversi). Si costruisce in tal modo il diagramma in fig. 57, nella quale si è trascurato P_0.

La retta $\overline{I_0 I_{cc}}$ è l'asse delle potenze, in quanto la semiretta $\overline{OC}$ separa la potenza resa dalla potenza assorbita. In O e in C si ha $P_r = 0$. Il tratto $\overline{C'B'}$ rappresenta le perdite joule nell'indotto e nell'induttore; per separarle si traccia $\overline{OA'}$, che divide $\overline{C'B'}$ in due segmenti proporzionali alle perdite rispettive. Di solito, dato che le due perdite sono molto simili, per tracciare $\overline{OA'}$ si divide $\overline{B'C'}$ in due segmenti uguali. La retta $\overline{OA'}$ è anche l'asse delle coppie, che sono date, per ogni condizione di carico, dalla distanza tra la circonferenza e $\overline{OA'}$. Quindi, trascurando le perdite a

vuoto (ad es. per $I = I'$), $\overline{A''B''}$ rappresenta le perdite joule nello statore, $\overline{A''C''}$ quelle nel rotore, $\overline{C''D}$ la P_r, $\overline{B''D}$ la P_{ass}; quindi

$$\eta = \frac{\overline{C''D}}{\overline{B''D} + \text{perdita a vuoto}}.$$

Dato che i valori ottenuti dal diagramma sono rappresentati in funzione della corrente assorbita per ottenere il modulo delle potenze, essendo $P = \sqrt{3}\ VI \cos\varphi$ ed essendo la tensione V costante, si moltiplica il valore ricavato $I \cos\varphi$ per $V\sqrt{3}$.

Il tratto $\overline{A''D}$ rappresenta la coppia, anch'essa espressa in Ampere come unità di misura. Per ottenere il suo valore in Joule/rad, tenendo presente che

$$P = \frac{2\pi c n_0}{60}\ (\text{Watt}), \quad \text{si ha} \quad c = \frac{9{,}55}{n_0} \cdot P\ (\text{Joule/rad}).$$

Da ultimo lo scorrimento è rappresentato dal rapporto

$$\frac{\overline{A''C''}}{\overline{A''D}} = \frac{\text{perdita Joule rotore}}{\text{potenza assorbita rotore}}.$$

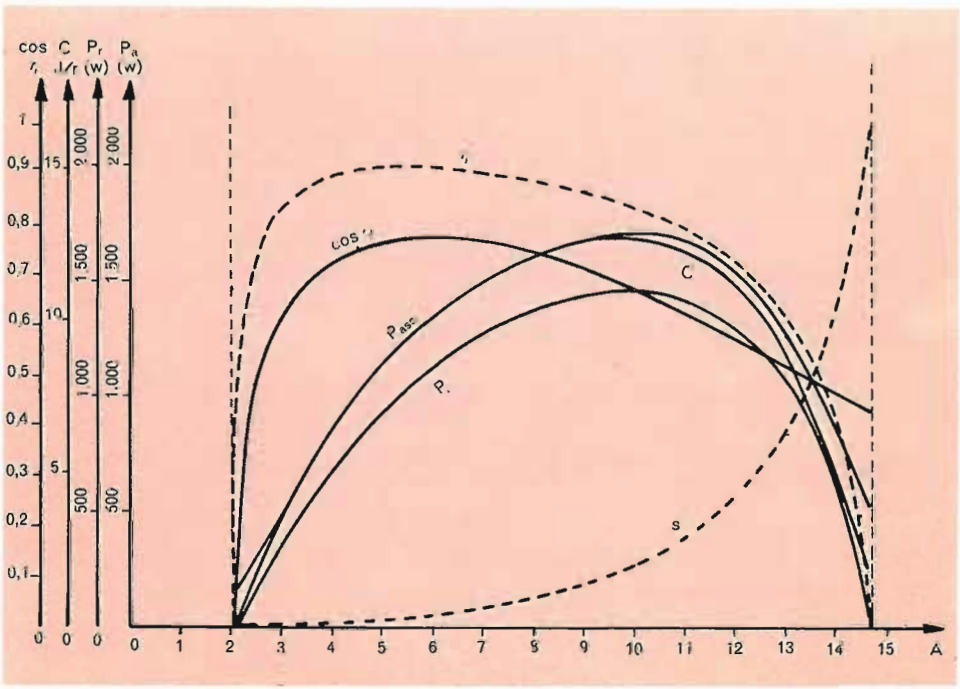


Fig. 57 - Diagramma dei rendimenti di un motore asincrono.

Si dimostra però facilmente che se si traccia una retta parallela all'asse delle coppie, avendo cura che la distanza tra le ordinate e il punto di intersezione con l'asse delle potenze sia divisibile per 10, la distanza, letta su tale retta, tra la ordinata e l'intersezione del vettore che ci rappresenta il carico a cui si sta studiando il motore, è proporzionale allo scorrimento s.

In tal modo dal diagramma circolare è possibile risalire alle varie curve caratteristiche del motore, cioè al diagramma con in ascisse I(carico) e in ordinate $\cos\varphi$, η, P_a, P_r, c, s.

Il motore preso in esame ha dato i risultati sperimentali indicati dalla tabella che segue:

Amperometro			W_A			W_B			Voltmetro		
δ div.	k A div.	I Amp	δ div.	k W div.	P Watt	δ div.	k Watt div.	P Watt	δ div.	k V div.	V Volt
4	1	4	85	2,5	213	—5	2,5	—13	60	1	60(1)
4,2	0,5	2,1	111	2,5	278	—74	2,5	—185	220	1	220(2)

Note: (1) Prova in corto circuito (2) Prova a vuoto

$$I'_{cc} : V'_{cc} = I_{cc} : 220 \qquad I_{cc} = \frac{220 \cdot 4}{60} = 14{,}7 \text{ A.}$$

Strumentazione

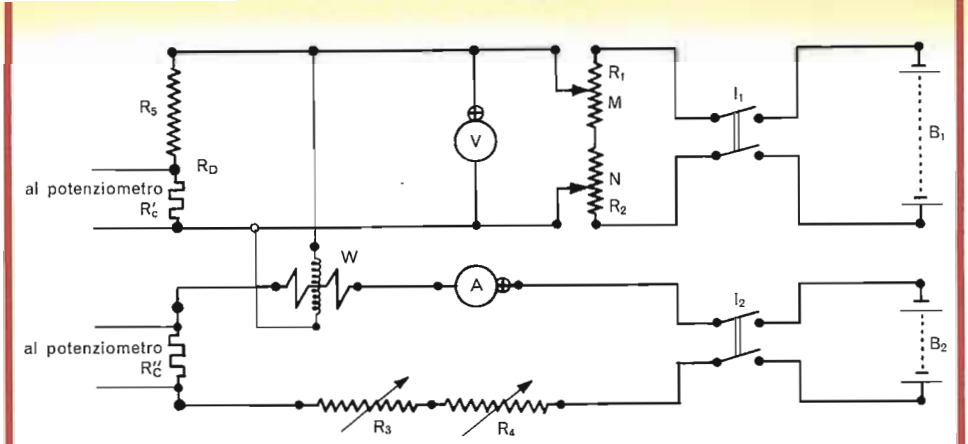
Motore asincrono trifase: CEM 220/380 V; 50 Hz; 2HP; 1500 giri/primo.

Variatori di tensione: S.D.; 125 V; I 10 A.

Voltmetro: «Norma»; N. 1145470; 5000 Ω/V; portata 300 V; classe 1,5.

Amperometri: Seb; N. 680030 e 680031; Mod. 2723; portata 5 A; classe 0,5.

Wattmetri: «Allocchio Bacchini»; Mod. 2988; N. 75581-75582; classe 1; 2,5 A; 150 V; portata 375 W.



B1, B2: alimentazioni – **I1, I2**: interruttori – **R1, R2, R3, R4**: reostati di regolazione – **V**: voltmetro – **A**: amperometro – **R'c**: e **R''c** resistenze campione – **R5**: cassetta di resistenze a decadi – **RD**: divisore di tensione – **W**: wattmetro.

Fig. 58 - Schema di taratura di un wattmetro mediante potenziometro.

Esercizio 27

Taratura di un wattmetro mediante il potenziometro

La taratura è eseguita mantenendo costanti i valori della corrente nella bobina del wattmetro, e variando la tensione applicata alla voltmetrica, onde poter ricavare da queste grandezze i valori della potenza che il wattmetro deve segnare (fig. 58).

La taratura della corrente che transita nell'amperometrica è ottenuta mettendo in serie ad essa una resistenza campione, così da avere ai suoi estremi una d.d.p. costante che viene fatta pervenire al potenziometro.

Mediante commutatore si inserisce quindi sul potenziometro il circuito voltmetrico dotato di riduttore (divisore) di tensione.

Per rilevazione molto precisa sarebbe opportuno ripetere ogni volta la taratura sia del circuito amperometrico che di quello voltmetrico, in pratica però le rilevazioni si fanno mantenendo il potenziometro inserito sempre sul circuito voltmetrico, supponendo costante la corrente in transito nell'amperometrica.

Confrontando le indicazioni del wattmetro (P) con il prodotto $VI = P_c$ si calcola:

l'errore percentuale: $E\% = \dfrac{P - P_c}{P_c} \cdot 100$;

l'errore assoluto: $E_a = P - P_c$.

Si traccia quindi il grafico $E\% = f(P)$ (fig. 59).

Nota: I circuiti voltmetrico e amperometrico del wattmetro sono indipendenti.

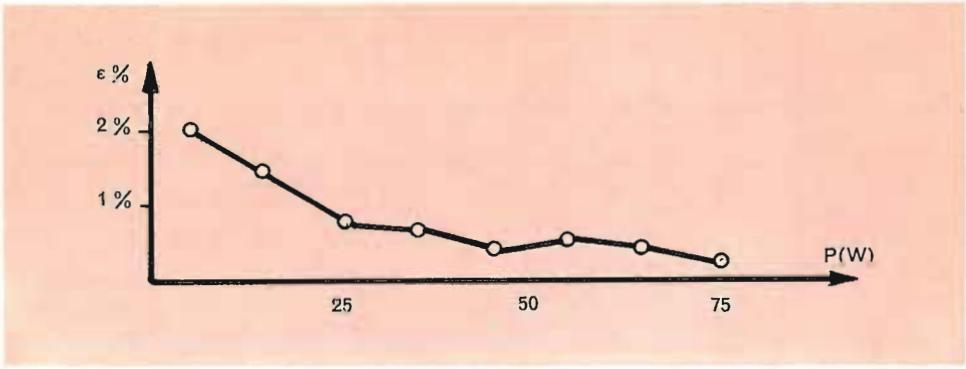


Fig. 59 - Grafico dell'errore percentuale.

Strumentazione

Accumulatori: «Tudor Alcalini»; 6 V; capacità 10 Ah in 5 h; batteria 5/5CS4; N. 3744/1 e N. 3744/3.

Stabilizzatore: bassa tensione continua Selo; Mod. SCB321Az; N. 1751.

Pila campione: tipo Weston Seb; N. 1596.

Reostato: Seci; 95 Ω; 2,5 A; Tipo 406/S; N. 6527.

Reostato: Seci; 28 Ω, 5,5 A; Tipo 506/S; N. 14072.

Cassetta di resistenza a decadi: «Allocchio Bacchini»; Mod. 1561/1; N. 70825.

Resistenze campione: FG «Neptun» in manganina:

a) 100 Ω int. a 20° C; LNr 901-00-103; FNr 134-017; MF01.

b) 1 Ω int. a 20° C; LNr 901-00-005; FNr 134-018; MF01.

Amperometro: «Allocchio Bacchini»; Mod. 2723; N. 75626; classe 0,5; portata fondo scala 2,5 A.

Voltmetro: «Precision»; Mod. P2M; N. 11860; classe 0,5; portata fondo scala 75 V.

Galvanometro: «Kipp Lightspot»; AL1; N. 610475.

Potenziometro c.c.: Seb; Mod. PT/2; N. 658939.

Wattmetro: «Allocchio Bacchini»; Mod. 3074/a; N. 53436; classe 0,2; portata fondo scala 75 V - 1 A.

Per la taratura di un wattmetro può essere usato un altro wattmetro più preciso, oppure un voltmetro e un amperometro.

In questo caso, però, questi due metodi non possono essere usati, perchè lo strumento a nostra disposizione è fra i più precisi (classe 0,2),

e non si può quindi tarare con strumenti della stessa classe o affetti da un autoconsumo relativamente elevato, richiedendo queste misure un alto grado di precisione. Ci si servirà pertanto di un potenziometro, cioè di un sistema in opposizione, con il quale la misura viene ridotta all'azzeramento di un indicatore, così che si evita l'effetto dell'autoconsumo proprio.

Un wattmetro è costituito da due circuiti, uno amperometrico e uno voltmetrico, ed è tarato in modo da segnare direttamente la potenza, ovvero il prodotto VI (in corrente continua).

I morsetti del circuito amperometrico si collegano, attraverso un reostato e una resistenza campione, ad una sorgente di f.e.m. il più possibile costante, in modo che l'intensità di corrente passante nel circuito rimanga la stessa per tutta la durata della prova: la corrente, passando attraverso la R'_c, provocherà ai capi di essa una differenza di potenziale che si misura con il potenziometro, e dal suo valore si risale a quello della intensità di corrente.

Con un altro generatore si alimenta, attraverso due reostati inseriti col sistema potenziometrico, il circuito voltmetrico, e la d.d.p. si misura con il potenziometro attraverso un divisore di tensione.

La potenza effettiva segnata dal wattmetro sarà:

$$P_c = V_c \cdot I_c,$$

in cui V_c è la d.d.p. esistente ai capi del circuito voltmetrico dello strumento misurata attraverso il potenziometro e la I_c è l'intensità di corrente che circola nel circuito amperometrico, misurata pure con il potenziometro.

Ad ogni valore P_c corrisponderà un valore P_w segnato dal wattmetro, il quale valore risulterà più o meno coincidente con P_c.

Sarà pertanto possibile costruire una curva di taratura riportando in ascisse i valori di P_w e in ordinate l'errore percentuale $\varepsilon\%$:

$$\varepsilon\% = \frac{P_w - P_c}{P_c} \cdot 100.$$

L'apparato di misura è costituito da tre parti principali: *a*) il potenziometro con l'alimentazione, il galvanometro e la pila campione; *b*) il circuito amperometrico formato da un alimentatore che dovrebbe erogare una corrente costante nel tempo, da un reostato per regolare la corrente, da un amperometro di controllo, dalla bobina amperometrica del wattmetro, e dalla resistenza campione di 1 Ω ai cui capi si deriva il potenziometro per misurare con precisione la caduta di tensione da essa provocata e quindi la

$$I = \frac{V}{R};$$

c) il circuito voltmetrico, i cui componenti sono un generatore di tensione continua variabile a piacere, un voltmetro di controllo, un divisore di tensione, e la bobina voltmetrica del wattmetro. La prima operazione da compiere è la campionatura del potenziometro. Si mette in opposizione una f.e.m. nota generata da una pila campione tipo Weston.

La f.e.m. di questa cella è a 20 °C 1,0183 V; usandola a temperature diverse, per misure di grandissima precisione, bisogna introdurre un fattore di correzione:

$$E_t = 1{,}018300 - 4{,}06 \cdot 10^{-5}(t - 20) - 9{,}5 \cdot 10^{-7}(t - 20)^2 + \\ + 1 \cdot 10^{-8}(t - 20)^3.$$

Per la nostra campionatura è sufficiente ritenere la f.e.m. 1,0183 V.

Si regolano M e N in modo che $M + N$ abbia lo stesso valore numerico della f.e.m. campione, indi si regola R_a finchè il galvanometro va a 0.

La posizione del cursore della resistenza non deve essere più modificata per tutta la prova.

Per eseguire la taratura del wattmetro si potrebbero usare tre metodi:

I) tenere l'intensità di corrente costante per tutta la prova, e variare la tensione;

II) tenere costante la tensione e variare la corrente;

III) variare entrambi.

Escluso a priori il terzo metodo perchè più scomodo, si è ritenuto opportuno usare il primo.

Agendo sui reostati R_3 e R_4 si fa circolare una corrente di circa 1 A nel circuito amperometrico (il valore approssimato del primo) si legge sull'amperometro), indi si collegano al potenziometro i morsetti della resistenza campione e si determina così il valore esatto della I_c. Dopo questa operazione si disinserisce il circuito amperometrico e si inserisce quello voltmetrico.

Per poter leggere al potenziometro i valori della tensione applicata al circuito voltmetrico si usa un divisore di tensione ohmico, con $k_{rid} = 100$.

Variando la tensione si fanno segnare al wattmetro valori prestabiliti, e contemporaneamente si leggono al potenziometro i valori di $M + N$, che moltiplicati k_{rid} danno la V_c.

Alla fine delle letture si controlla il valore della I_c, e si è osservato che è leggermente diverso, e precisamente di 14 mA. Si può supporre che la variazione della I_c nel tempo sia stata lineare, e si esegue quindi una interpolazione per avere i valori della I_c corrispondenti alle letture di V_c.

Wattmetro			M + N	k_{rid}	V_c	M′ + N′	R_c	I_c	P_c	ε_a	ε%
δ div.	k W div.	P W	volt	volt volt	volt	volt	Ω	A	W	W	
150	0,5	75	0,7450	100	74,50	1,004	1	1,004	74,80	0,20	0,268%
130		65	0,6458		64,58	1,002		1,002	64,71	0,29	0,448%
110		55	0,5472		54,72	1,000		1,000	54,72	0,28	0,513%
90		45	0,4490		44,90	0,998		0,998	44,81	0,19	0,424%
70		35	0,3490		34,90	0,996		0,996	34,76	0,24	0,690%
50		25	0,2495		24,95	0,994		0,994	24,80	0,20	0,808%
30		15	0,1490		14,90	0,992		0,992	94,78	0,22	1,493%
10		5	0,0495		4,95	0,990		0,990	4,90	0,10	2,040%

Esercizio 28

Rilievo della caratteristica esterna della dinamo con eccitazione in parallelo

Il rilievo della caratteristica esterna di una dinamo eccitata in derivazione si effettua realizzando il collegamento raffigurato, il quale comprende: un motore capace di far ruotare la dinamo alla velocità nominale in un reostato da campo per regolare l'eccitazione, e un carico variabile $R_1 R_2 R_3$... costituito nel nostro caso da lampade disposte in parallelo (fig. 60). La caratteristica esterna è data dalla curva che rappresenta l'andamento della tensione di capi della dinamo in funzione della corrente di carico.

Evidentemente la curva ha un andamento decrescente, in quanto, all'aumentare della corrente erogata, aumentano le cadute ohmiche insieme

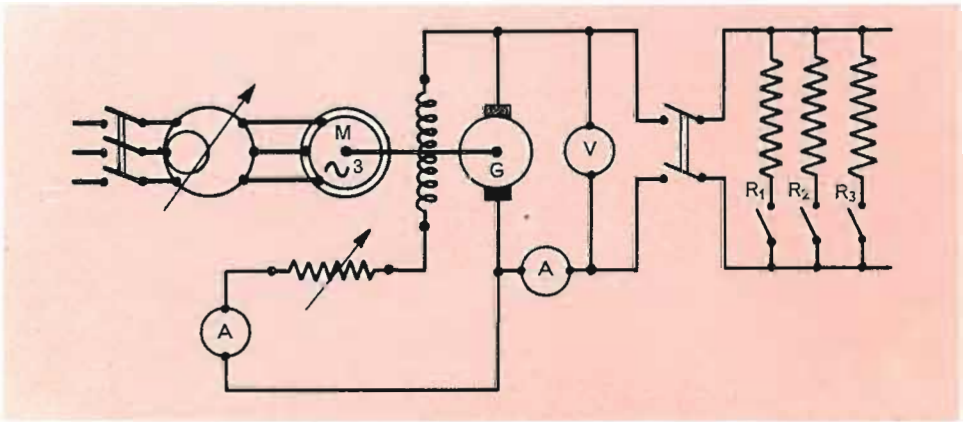


Fig. 60 - Schema di rilievo della caratteristica esterna di una dinamo.

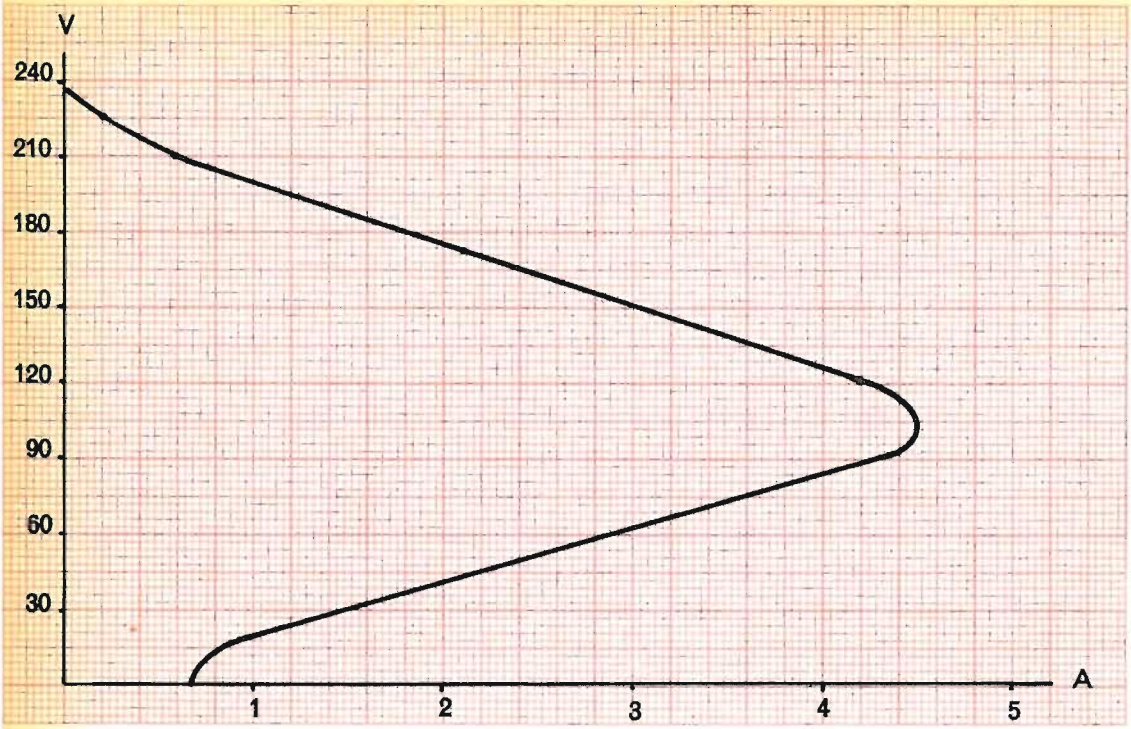


Fig. 61 - Curva caratteristica esterna della dinamo.

alla caduta dovuta alla reazione di indotto nell'interno della macchina, facendo di conseguenza diminuire la tensione ai capi della stessa.

Essendo poi la dinamo eccitata in parallelo, questa diminuzione di tensione provoca una diseccitazione della macchina, a cui si pone rimedio operando sul reostato di campo.

N.	Voltmetro			Amperometro			Note
	δ div.	k V/div.	V	δ div.	k A/div.	I A	
1	47	5	235	0	1	0	Corrente di eccitazione 150 mA.
2	45		225	0,11		0,11	
3	42		210	0,64		0,64	
4	39,4		197	1,24		1,24	
5	36,6		183	1,8		1,8	
6	34,2		171	2,2		2,2	
7	32,8		164	2,6		2,6	
8	28,4		142	3,1		3,1	
9	27,2		136	3,4		3,4	
10	25,4		127	3,85		3,85	
11	24		120	3,2		4,2	
12	22		110	4,45		4,45	
13	20		100	4,55		4,55	
14	0		0	0,65		0,65	

Se però la corrente di carico continua ad aumentare, si arriva ad un certo valore al quale la dinamo non è più in grado di eccitarsi; la corrente di carico subisce quindi una brusca diminuzione, e tenderebbe anzi a 0, se non ci fosse il magnetismo residuo della macchina.

La prova è stata condotta mantenendo costante la corrente di eccitazione (fig. 61).

Strumentazione

Interruttore: min 42.
Reostato di campo: (eccitazione); V 110; 0,15 A.
Reostato: R 31 «Seci»; 300 V; 1,5 A.
Milliamperometro: AC 3; Elettromagnetico «Precision» Milano.
Amperometro: AC 9; «Precision» Milano; elettrodinamico; classe 1.
Amperometro: AA 4; «Precision» Milano; elettrodinamico; classe 2,5.
Voltmetro: VC 3; «Norma»; elettromagnetico; classe 0,5; c.c. 1000 Ohm/V.
Interruttore: «Ticino»; In 5/25; 380 V; tarato 25 A.

Esercizio 29

Determinazione della permeabilità magnetica dell'aria per mezzo del galvanometro balistico

Caratteristiche degli strumenti

Si osservi lo schema della fig. 62 e la descrizione della prova.

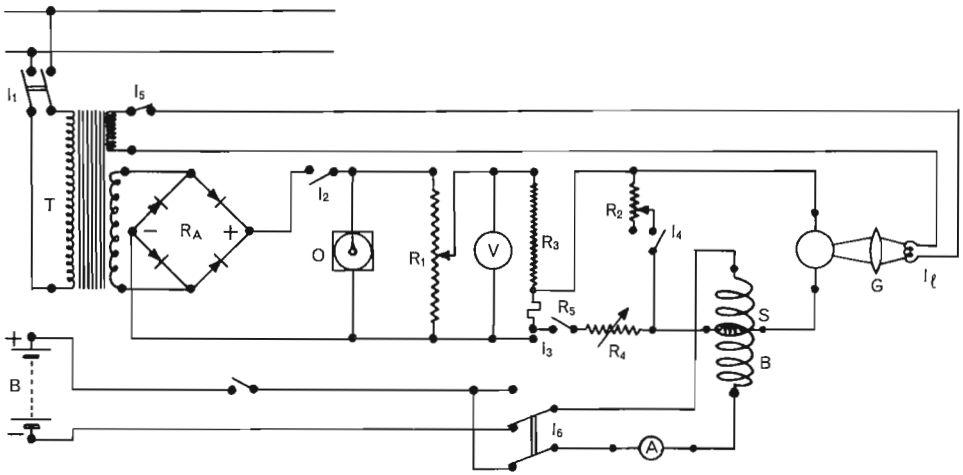
Supponiamo di avere in un circuito come quello in fig. 63 un induttore ideale, cioè di resistenza nulla. Con il deviatore nella posizione 1-4, se applichiamo la legge di Ohm ne deduciamo che, se E è il valore della f.e.m. della pila e r quello della sua resistenza interna, si avrà:

$$I = \frac{E}{r} \quad \text{e} \quad V = 0.$$

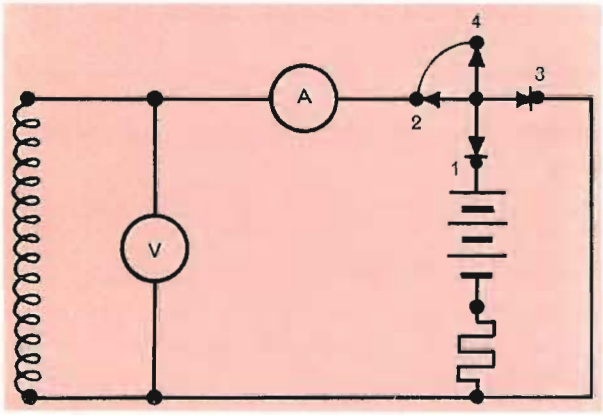
Si definisce *grandezza caratteristica* dell'induttore la funzione impulso di tensione

$$U = \int V \, dT.$$

Essendo in grado di rilevare, per esempio con strumenti oscillografici, i valori istantanei della corrente e della tensione, si potrebbero tracciare diagrammi della fig. 64 in cui sono tratteggiate le curve teoriche di $V = f(t)$.

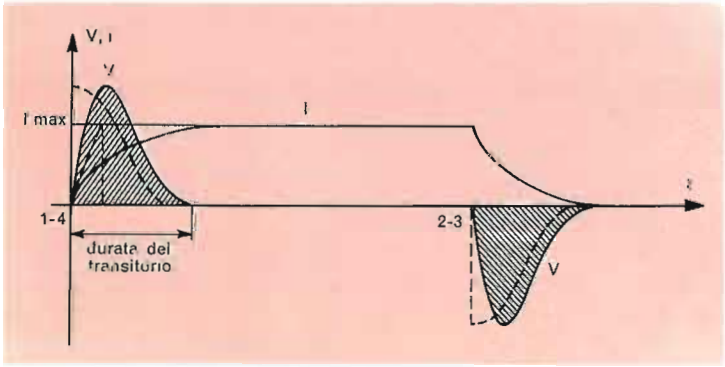


$I_{1,2,3,4,5}$: interruttori – **RA**: raddrizzatore – **O**: orologio elettrico – **V**: voltmetro – **T**: trasformatore a prese multiple – $R_{1,2}$: reostati – R_3 e R_5: divisore di tensione – R_4: cassetta di resistenze a decadi – **G**: galvanometro balistico – I_ℓ: dispositivo di illuminazione – **S**: sonda – **B**: bobina – **A**: amperometro – I_6: invertitore **B**: alimentazione.



▲ Fig. 62 - Schema per la determinazione della permeabilità dell'aria.

◀ Fig. 63 - Circuito schematico della prova.



▼ Fig. 64 - Diagramma della corrente in un transitorio.

Si osserva dapprima che la corrente, chiuso il contatto 1-4, impiega un certo tempo, detto periodo transitorio, prima di raggiungere il valore massimo, e ora, girato il commutatore nella posizione 2-3, non si annulla istantaneamente al cessare delle f.e.m., ma decresce con legge circa esponenziale. Riguardo alla tensione, l'impulso U assorbito viene restituito ma cambiato di segno.

Per un certo induttore, variando E variano anche I e U e si può stabilire una corrispondenza lineare impulsi di tensione e correnti: $U = -LI$; L si definisce induttanza, e le sue dimensioni sono:

$$\frac{\text{Volt} \cdot \text{secondo}}{\text{Ampere}} = \text{Henry (H)}.$$

Uguagliando la definizione

$$U = \int V\,dt \text{ alla legge } U = -LI \text{ si ha } -LI = \int V\,dt,$$

da cui derivando membro a membro

$$V = -L\frac{dI}{dt}.$$

In un induttore, quindi, la tensione rilevata ai morsetti è data dal prodotto dell'induttanza per la derivata della corrente rispetto al tempo.

Se n è il numero delle spire di cui è costituito l'induttore, si rileva sperimentalmente che l'impulso è proporzionale a n secondo un coefficiente dato dalla relazione $U = -\Phi n$; Φ si definisce flusso magnetico, o impulso di tensione per spira, e le sue dimensioni sono Volt · secondo = Weber (*Wb*).

Usando diversi induttori si è osservato che per ottenere lo stesso flusso è necessario che resti costante il prodotto $n \cdot I = M$, chiamato tensione magnetica e misurato in amperspire. Dalle tre relazioni:

$$L = -\frac{U}{I}, \qquad U = -\Phi n,$$

$$I = \frac{M}{n},$$

si ricava

$$L = \frac{\Phi}{M}n^2$$

e

$$\Phi = \frac{LM}{n^2}.$$

Si introducono le grandezze

$$\frac{\Phi}{M} = \Lambda \text{ (permeanza in } H)$$

e

$$\frac{M}{\Phi} = \mathcal{R} \text{ (riluttanza in } H^{-1}).$$

Dalle due relazioni:

$$U = \int V\,dt \qquad \text{e} \qquad U = \Phi n,$$

si ricava

$$V = -n\frac{d\Phi}{dt}.$$

Il segno meno è dovuto al fatto che, se il circuito fosse chiuso, la f.e.m. indotta farebbe circolare una corrente tale da opporsi alla variazione di flusso.

Gli impulsi di tensione si possono misurare facilmente con il galvanometro balistico, che è costituito da un equipaggio mobile capace di deviare di un angolo proporzionale all'area della grandezza impulsiva che gli è applicata. Il suo funzionamento è paragonabile a quello di un pendolo dotato di una forte massa inerziale. Una sollecitazione sufficientemente breve imprime al pendolo una oscillazione che, almeno per il valore iniziale, è proporzionale alla sollecitazione stessa. Analogamente l'impulso di tensione, in quanto è costituito da una grandezza di grande intensità e di breve durata, viene assorbita dal galvanometro e trasferito in quantità di moto del suo equipaggio. Operazione preliminare da eseguirsi è la taratura del galvanometro. A tale scopo si inviano nello strumento impulsi noti e si controllano le deviazioni δ dell'indice luminoso. Per quanto sopra detto $U = k_b\delta$, da cui $k_b = \dfrac{V}{\delta}$ = costante balistica del galvanometro, che ci permette di conoscere il valore dell'impulso di tensione dall'espressione $\delta \cdot k_b$. Ricordando che:

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{M}{l}$$

e che

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{U}{nA},$$

in cui A è l'area della sonda, N il numero di spire dell'induttore e n il numero di spire della sonda, potremo, calcolando H e misurando U, risalire al valore di B, poichè $B = \mu H$.

Per determinare la permeabilità magnetica dell'aria è necessario eseguire prima la taratura del galvanometro, cioè determinare la costante balistica k_b. Il circuito per la determinazione di k_b è alimentato da una corrente pulsante a 16 V, ottenuta mediante trasformatore e raddrizzatore, da un orologio che entra in funzione contemporaneamente al galvanometro, da un reostato R_1 inserito con il sistema potenziometrico, da cui è derivato il voltmetro, e dal divisore di tensione R_3 e R_5 ($R_3 = 5093\ \Omega$, R_5 1 Ω); ai capi di R_5 è derivato il circuito galvanometrico, che è soggetto alla tensione

$$\frac{V \cdot R_5}{R_3 + R_5} = \frac{V}{5094}.$$

Il galvanometro può essere più o meno protetto inserendo una resistenza variabile in parallelo. Poichè lo smorzamento del galvanometro è proporzionale all'inverso della resistenza del circuito su cui è chiuso, inserendo il circuito di protezione con lo sua resistenza assai piccola è possibile frenare l'equipaggio energicamente. La condizione di massima sensibilità si ha ovviamente quando il circuito di protezione è escluso.

La prima operazione da eseguire è la determinazione della resistenza critica, poi è conveniente operare con una resistenza leggermente superiore a questo valore. Il diagramma dell'elongazione in funzione del tempo è di tipo ondulatorio per basse resistenze e di tipo smorzato per alte. La *resistenza critica* è il valore limite del circuito su cui è chiuso il galvanometro per il quale si passa da una caratteristica ondulatoria ad una smorzata. Quindi varieremo la R_4 finchè raggiungeremo tali condizioni. La resistenza critica è $R_0 = R_4 + R_{\text{sonda}} + R_{\text{galv an}} + R_5 = 330 + 27{,}5 + 14 + + 1\ \Omega = 372{,}5\ \Omega$. Le successive operazioni saranno quindi eseguite con $R_4 = 340\ \Omega$ in modo da avere una resistenza leggermente superiore a quella critica.

Per determinare k_b si fissa un certo valore di tensione agendo sul reostato R_1 (con I_3 aperto); indi si apre I_2, si chiude I_3, si porta a zero l'orologio e si chiude I_2 per un tempo che non deve essere molto superiore di $\frac{1}{10}$ del periodo di oscillazione, precedentemente misurato con un cronometro, e si legge l'elongazione dell'indice luminoso, e il tempo sull'orologio elettrico. Variando R_1 si otterranno diversi valori di U e δ ($U = V \cdot t$), da cui si hanno diversi valori di

$$k_b = \frac{U}{\delta}.$$

Noto $k_{b\,\text{medio}}$ si può passare alla determinazione della permeabilità magnetica dell'aria, che è circa uguale a μ_0. A tale scopo si inserisce il circuito di misura, costituito da un induttore, avvolto intorno alla sonda, alimen-

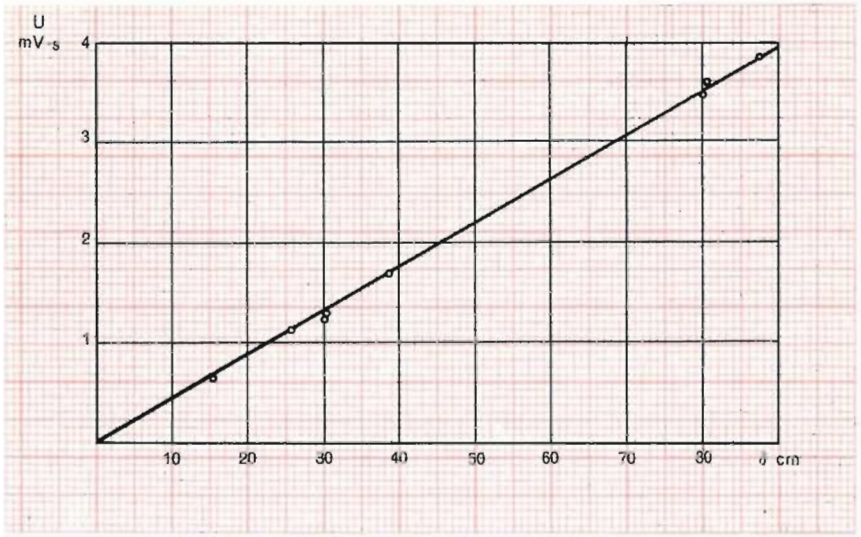


Fig. 65 - Determinazione della permeabilità dell'aria.

tato da una sorgente variabile di f.e.m., attraverso un invertitore e un amperometro. La sonda era anche prima inserita in serie nel circuito galvanometrico. Se nell'induttore circola una certa corrente I, questa provocherà un campo magnetico H facilmente calcolabile, con una certa induzione $B = \mu H$, (fig. 65).

Per determinare B si inverte il verso della corrente per mezzo dell'invertitore, e si legge l'elongazione dell'indice luminoso del galvanometro. Essendo

$$U = k_b \delta \qquad \text{e} \qquad B = \frac{U}{nS},$$

in cui n è il numero di spire della sonda e S la sua sezione, si avrà tenendo anche presente che l'impulso δ' vale 1/2 del valore letto, perchè in questo caso la corrente non si annulla ma si inverte (quindi $\delta' = 1/2\ \delta$, in cui δ è l'impulso letto):

$$B = \frac{k_b \cdot \delta'}{n \cdot S}, \qquad \mu = \frac{k_b \cdot \delta'}{n \cdot S \cdot H};$$

e poichè

$$H = \frac{NI}{l}, \qquad \text{si ha:} \qquad \mu = \frac{k_b \delta' \cdot l}{n \cdot S \cdot I \cdot N},$$

in cui N è il numero di spire dell'induttore, l la sua lunghezza e I la corrente in esso.

Determinazione della costante balistica

N.	V volt	Tempo sec.	k_r	U mV · S	δ cm	Note
1	2	1,67	1/5.094	0,66	15,4	Periodo di oscillazione 9,55 s
2	4	1,42		1,12	25,6	
3	6	1,06		1,23	29,9	$R_c = 372{,}5\ \Omega$
4	8	1,06		1,67	38,5	$k_b = \frac{Vt}{\delta}$
5	10	0,66		1,295	30,1	
6	12	1,62		3,83	87	
7	14	1,29		3,56	80,4	$k_{\delta medio} = 4{,}45 \cdot 10^{-5} \frac{volt \cdot s}{cm}$
8	16	1,11		3,48	80,1	

Determinazione della permeabilità dell'aria

N.	Amperometro δ div.	Amperometro k A/div.	Amperometro I A	δ cm	Note
1	1,09	1	1,09	8,9	$\mu = \frac{k_b \delta \cdot I}{nN\delta l \cdot 2}$; $l = 0{,}5$ m; $N = 240$ spire;
2	1,8	1	1,8	13,3	$n = 100$ spire; $s = 3{,}5 \cdot 10^{-3}\ m^2$
3	2,36	1	2,36	17,7	
4	2,67	1	2,67	20,2	μ aria medio $= 1{,}15 \cdot 10^{-6}$ H/m
5	3,3	1	3,3	24,9	

Esercizio 30

Separazioni delle perdite nel ferro da quelle meccaniche in un motore a corrente continua

Le perdite nel ferro e quelle meccaniche di una macchina a corrente continua funzionante da motore (come in questo caso), sono date dalla potenza che la macchina assorbe dalla linea per mantenersi in rotazione a vuoto alla sua velocità normale (fig. 66).

Per la loro rilevazione ci si avvale del circuito schematizzato. L'amperometro va inserito direttamente in serie all'indotto affinchè esso non rilevi anche la corrente di eccitazione; inoltre il voltmetro va derivato fra le spazzole della macchina, onde escludere le eventuali cadute di tensione nel reostato d'avviamento.

Premesso ciò, dato che il motore funziona a vuoto, la potenza elettrica che esso assorbe dalla rete sarà soltanto quella necessaria a vincere: le

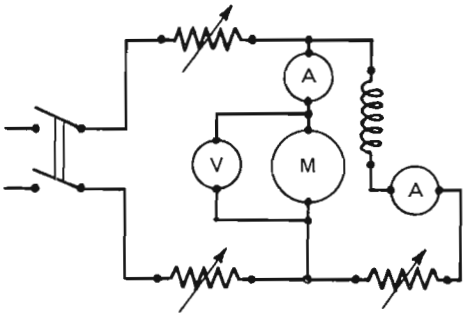


Fig. 66 - Schema per la separazione delle perdite in un motore a corrente continua.

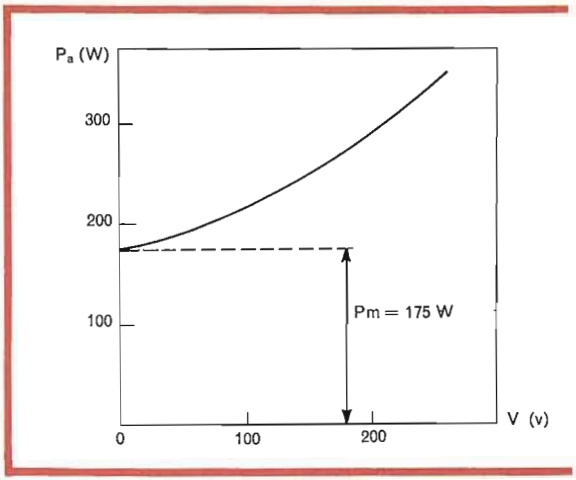


Fig. 67 - Diagramma per la separazione delle perdite.

perdite nel ferro (isteresi, correnti parassite), le perdite meccaniche (attriti) e le perdite nel rame. Essendo però queste ultime molto piccole, poichè la corrente d'indotto non assume valori elevati, si possono per ipotesi semplificativa trascurare. Varrà quindi la relazione:

$$P_0 = P_m + P_{Fe}$$

in cui:

P_m = perdite meccaniche;
P_{Fe} = perdite nel ferro;
P_0 = potenza assorbita a vuoto dal motore.

Si vede immediatamente che, mantenendo costante la velocità del motore, P_m rimane costante, mentre P_{Fe} risulta funzione della tensione applicata al motore.

Volendo pervenire alla separazione delle perdite meccaniche da quelle nel ferro, si effettuano diverse determinazioni della potenza assorbita a vuoto dal motore facendo via via decrescere la tensione alle spazzole, e diminuendo contemporaneamente la corrente d'eccitazione, onde mantenere costante il numero di giri. Si ottiene così una serie di punti decrescente, la cui interpolazione è rappresentata dal diagramma della funzione: $(P_m + P_{Fe}) = f(V)$ (fig. 67).

Teoricamente, per rilevare le perdite meccaniche del motore, sarebbe sufficiente misurare la potenza che esso assorbe allorchè la tensione alle spazzole è nulla, ma in queste condizioni il motore non può più essere mantenuto alla velocità normale (3000 giri/1') per cui la rilevazione è inesatta.

Per ovviare ciò, ottenuto il ramo della caratteristica $P_0 = f(V)$ lo si extrapola a $V = 0$, ottenendo con buona approssimazione le perdite meccaniche (essendo a $V = 0$, $P_{Fe} = 0$).

Strumentazione

Voltmetro: «Precision» Milano; 1000 Ω/V; f.s. 300 V; N. 210.540.

Voltmetro: «Seb»; 1000 Ω/V; f.s. 300 V; N. 680.324.

Amperometro: «Precision» Milano; 5 A; 100 mV; N. 42.199.

Amperometro: «Precision» Milano; 5 A; N. 11.871.

Resistenze: «Seci»; 140 Ω - 100 Ω - 28 Ω - 350 Ω.

Macchina: c.c. «Pellizzari» PDU; N. 1.812.888; N. 3000 giri; P 4000 W; V 220; A 18; eccitazione separata V 110 - A 0,86.

N.	Voltmetro			Amperometro			Perdite
	δ	k	V	δ	k	I	P_0
	div.	V/div.	V	div.	A/div.	A	W
1	229	1	229	73	0,02	1,46	334,34
2	219	↓	219	74,5	↓	1,49	324,82
3	205	↓	205	76	↓	1,52	311,6
4	191	↓	191	77	↓	1,54	294,14
5	178	↓	178	79	↓	1,58	281,24
6	163	↓	163	83	↓	1,66	270,58
7	147	↓	147	88	↓	1,76	258,72
8	137	↓	137	90,5	↓	1,81	247,97
9	105	↓	105	106,5	↓	2,13	223,65

Esercizio 31

Rilievo delle caratteristiche di un triodo

L'*effetto termoionico* consiste nell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica portata all'incandescenza. Esso può dimostrarsi sperimentalmente nel modo seguente. In una ampolla di vetro in cui è stato fatto l'alto vuoto è contenuto un filamento metallico F (per esempio di tungsteno), che può essere reso incandescente per effetto Joule facendovi passare una corrente elettrica di sufficiente intensità. Di fronte al filamento si ha un secondo elettrodo metallico P (placca), che può essere portato ad un potenziale di qualche centinaio di volt positivo rispetto al filamento. Se il filamento è a temperatura relativamente bassa l'amperometro (o meglio un milliamperometro) non segna passaggio di corrente, qualunque

sia il potenziale a cui viene mantenuta la placca. Se invece il filamento è incandescente e la placca è mantenuta, per esempio per mezzo di una pila G, ad un potenziale positivo rispetto al filamento, lo strumento segna il passaggio di una corrente diretta nel senso FP, la cui intensità dipende in generale sia dal potenziale della placca sia dalla temperatura del filamento. Se invece la placca è negativa, non si osserva il passaggio di alcuna corrente.

Possiamo renderci qualitativamente conto di questo fenomeno, osservando che gli elettroni di conduzione formano all'interno del metallo una specie di gas, detto appunto gas degenerato di Fermi; essi si muovono urtando contro i resti atomici legati ai nodi del reticolo cristallino.

Con l'aumentare della temperatura del metallo anche gli elettroni di conduzione aumentano la loro energia cinetica media.

A temperatura ambiente, gli elettroni sono trattenuti nell'interno del metallo da un fenomeno un po' analogo a quello della tensione superficiale: possiamo immaginare che all'interno del metallo le attrazioni su un determinato elettrone siano praticamente equilibrate, e l'elettrone si comporti quindi come se fosse libero. Alla superficie, invece, l'attrazione dei resti atomici superficiali non viene equilibrata da altre forze, e l'elettrone è attratto verso l'interno del metallo. Si capisce quindi come sia sempre necessario compiere un lavoro per estrarre un elettrone da un metallo.

In altre parole, tutto avviene come se l'intero spazio occupato dal metallo fosse per ciascun elettrone uno spazio equipotenziale (in cui perciò il campo elettrico è nullo) e così pure il campo esterno al metallo, ma tra l'interno e l'esterno ai limiti del metallo vi fosse una brusca diminuzione del potenziale e quindi un campo elettrico tendente a impedire la fuoriuscita dell'elettrone. A temperatura ordinaria, praticamente tutti gli elettroni di conduzione hanno energia cinetica insufficiente a superare tale barriera di potenziale. Ma se la temperatura diviene sufficientemente elevata, alcuni elettroni acquistano un'energia cinetica maggiore di essa: quindi, se vengono a trovarsi in prossimità della superficie limite e con la velocità diretta verso l'esterno, escono senz'altro dal metallo.

Il fenomeno della conducibilità elettrica in un metallo è regolato dalla legge di Ohm $I = \frac{V}{R}$. Questo perchè in un conduttore di prima specie gli elettroni di conduzione sono sottoposti a una sollecitazione tale da muoversi nella direzione del campo elettrico applicato con una velocità il cui valore medio è costante cosicchè nessuna parte del circuito risente di una accumulazione di cariche elettriche.

Ciò non avviene nel caso del fenomeno termoelettrico. Le leggi dell'effetto termoionico si riassumono in due espressioni, che corrispondono a due diversi regimi di emissione.

Se il potenziale di placca è sufficientemente elevato, tutti gli elettroni emessi dal filamento vengono immediatamente allontanati dall'elettrodo emittente e l'intensità di corrente è limitata essenzialmente dalla temperatura del filamento.

In queste condizioni (*regime di saturazione*), l'intensità di corrente (indipendentemente dalla tensione placca-filamento) è data dalla *legge di Richardson*:

$$I_a = AT^2 \, e^{-\frac{b}{kT}},$$

in cui A è una costante dipendente dalla geometria del circuito, T è la temperatura assoluta del filamento, b è una costante caratteristica del metallo, che prende il nome di lavoro di estrazione e rappresenta l'energia minima occorrente per estrarre un elettrone dal metallo stesso, k è la costante di Boltzmann (uguale al rapporto tra la costante R dei gas e il numero di Avogadro N).

La verifica sperimentale di questa legge permette, almeno in linea teorica, la misura di b.

Se invece il potenziale di placca è relativamente basso, gli elettroni emessi costituiscono attorno al filamento una nuvola di elettricità negativa (carica spaziale), che limita l'ulteriore emissione di elettroni del filamento. In queste condizioni (*regime di carica spaziale*) l'intensità di corrente dipende essenzialmente dal potenziale della placca ed è invece indipendente dalla temperatura del filamento. Essa è data dalla *legge di Langmuir e Schottky*

$$I_a = aU_a^{3/2},$$

dove a è una costante che dipende dal dispositivo adottato. L'apparato illustrato nella fig. 68 non è altro che un tubo elettronico a due elettrodi, o diodo, la cui caratteristica fondamentale è quella di permettere il passaggio della corrente in un solo senso. Esso ha trovato di conseguenza il suo impiego più importante nel raddrizzamento delle correnti alternate, anche se attualmente è sempre più sostituito da raddrizzatori a semiconduttori drogati (vedi il testo Oliva-Cardillo: Elementi di Elettrotecnica, pag. 296).

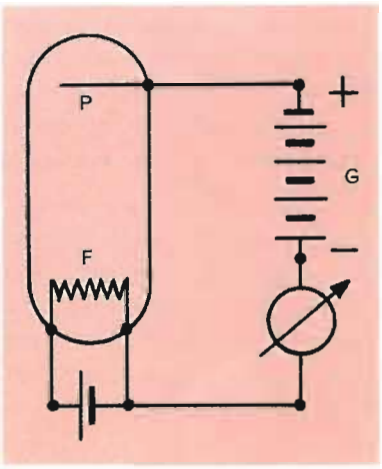
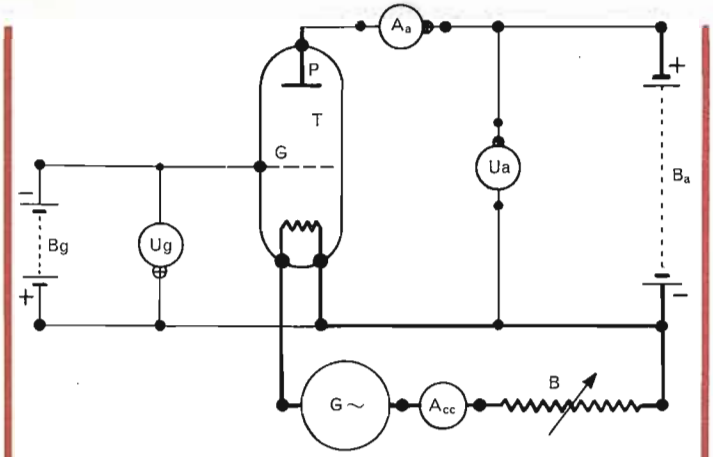


Fig. 68 - Tubo elettronico (diodo).

Il tubo elettronico immediatamente più completo è il tubo a tre elettrodi, o triodo, che costituisce l'esame di questa esercitazione. In esso la placca è separata dal filamento da un terzo elettrodo, costituito da una sottile rete metallica, o griglia. Gli elettroni, emessi dal filamento in-



Bg: alimentazione del circuito di griglia — **Ba**: alimentazione del circuito anodico — **G**~: alimentazione del circuito di accensione — **Aa**, **Acc**: amperometri — **Ug**, **Ua**: voltmetri — **T**: triodo — **P**: placca — **G**: griglia — **F**: filamento.

Fig. 69 - Schema per il rilievo delle caratteristiche di un triodo.

candescente, devono ora passare attraverso le maglie della griglia. Di conseguenza, la corrente placca-filamento non dipende più soltanto dalla tensione anodica e dalla temperatura del filamento. Essa dipende ora in modo essenziale dalla differenza di potenziale tra la griglia e il filamento (fig. 69). Se infatti la griglia è a un potenziale molto più basso rispetto al filamento, gli elettroni vengono tutti respinti verso il filamento emittente e nessuno di essi può raggiungere la placca. Se invece la griglia è al potenziale del filamento o anche a un potenziale un po' meno elevato, il numero di elettroni che raggiungono la placca dipende sostanzialmente dalla differenza di potenziale tra filamento e griglia (Oliva-Cardillo: Elementi di Elettrotecnica, pag. 330).

Rimanendo fissi il potenziale di placca e la temperatura del filamento, ad ogni valore del potenziale di griglia U_g corrisponde un ben determinato valore della corrente di placca I_a. Con la piccola potenza necessaria per far variare il potenziale di griglia, si può così « comandare » una corrente relativamente intensa come quella anodica, si può aprire o chiudere il circuito anodico o far variare in un modo qualsiasi prefissato l'intensità della corrente che circola in esso.

Il dispositivo rappresenta in pratica un sensibilissimo e pronto relais, che ha trovato nella tecnica innumerevoli applicazioni. Indichiamo con *acc* (accensione) le grandezze che si riferiscono al filamento, con *a* le grandezze che si riferiscono alla placca e con *g* quelle che si riferiscono alla griglia. Rilevando i valori di I_a al variare di U_g con $I_{acc} = \text{cost}$ e $U_a = \text{cost}$ si può costruire una curva $I_a = f(U_g)_{Ua=cost}$ e $_{Iacc=cost}$, e altre se ne possono costruire con diverso U_a.

Da questa famiglia di curve se ne può ricavare graficamente un'altra, di $I_a = f\,(U_a)_{Iacc=cost\ Ug=cost}$ ai diversi U_g.

Tutte le caratteristiche sono linee curve ma si possono sostituire nella parte mediana, con sufficiente approssimazione, a segmenti rettilinei che permettono di definire tre parametri caratteristici di un triodo:

1) la pendenza S, definita come

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}\right)_{Iacc=cost\ Ua=cost}$$

espressa in Ω^{-1};

2) il coefficiente di amplificazione

$$\frac{1}{D} = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}\right)_{Iacc=cost\ Ia=cost}$$

che è un numero puro;

3) la resistenza interna del tubo

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}\right)_{Iacc=cost\ Ug=cost}$$

espressa in Ω.

Le grandezze S, D e R_i sono legate dalla semplice relazione, detta *relazione di Barkhasen*:

$$S \cdot D \cdot R_i = 1.$$

La potenza assorbita dal triodo $W_a = I_a U_a$ si chiama dissipazione anodica, e non deve superare certi limiti, che variano da valvola a valvola.

La prima parte dell'esperienza eseguita consiste nel tracciare i grafici $I_a = f(U_a)_{Iacc=cost}$ a diversi valori di I_{acc}, con $U_g = 0$, onde osservare il fenomeno della saturazione (fig. 70).

Un alimentatore azionato dalla rete ci fornisce la corrente alternata che riscalda il filamento, la tensione anodica continua positiva rispetto al filamento, e la tensione di griglia uguale a quella del filamento. Il circuito di accensione comprende un amperometro e un reostato per regolare la I_{acc}; questo perchè nei triodi moderni il potere emissivo dei catodi è così elevato che non si può misurare la corrente di saturazione corrispondente ad una temperatura di riscaldamento uguale a quella di funzionamento senza compromettere il catodo medesimo. Il circuito anodico è costituito da un amperometro, un voltmetro e di un reostato inserito come potenziamento nell'alimentatore stesso (fig. 69). Si fissa un certo valore di I_{acc}, poi si aumenta di 50 V in 50 V le U_a leggendo il corrispondente valore di I_a; poi si fissa un altro valore di I_{acc} e si ripete l'operazione; si riporteranno poi i valori trovati in un grafico avente in ascisse la U_a e in ordinata la I_a.

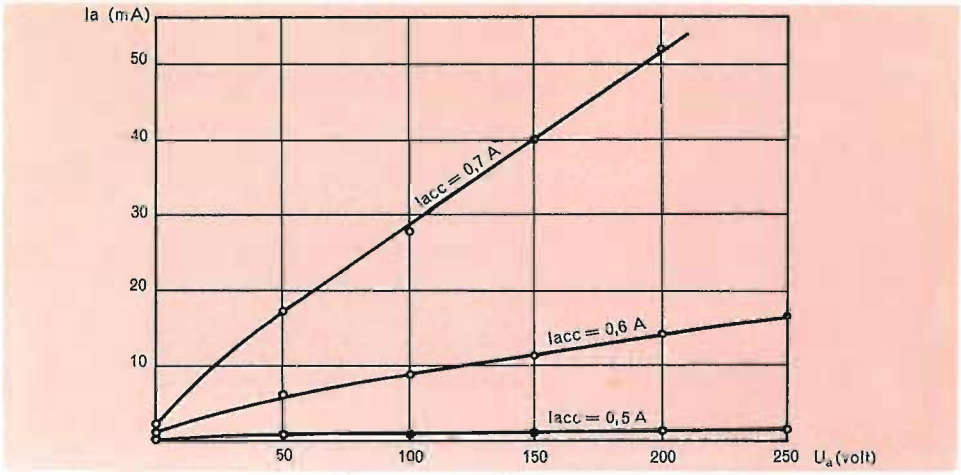


Fig. 70. Curva caratteristica corrente di placca - corrente di accensione.

La seconda parte dell'esperienza consiste nel determinare la caratteristica esterna del triodo; I_{acc} si tiene sempre costante.

Si fissa un certo valore di U_a, per esempio 200 V, e si diminuisce U_g di 5 V in 5 V (fino a quando si annulla I_a) leggendo sull'amperometro A_a i valori di I_a. Si fissa un nuovo valore di U_a, 150 V (poi 100 V e 50 V) e si ripete l'operazione (grafico di fig. 71).

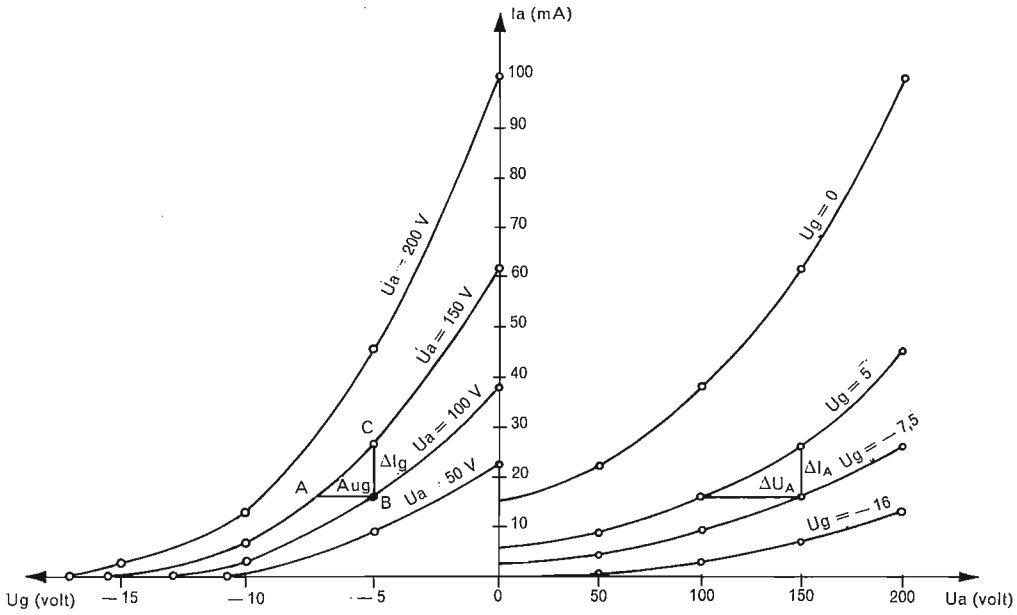


Fig. 71 - Curva caratteristica di un triodo.

È da notare il fatto che, dopo aver fissato un determinato valore per U_a, variando U_g varia I_a e di conseguenza (anche se di poco) U_a, che bisogna, agendo sul reostato, riportare al valore prestabilito.

Con i dati ottenuti si costruiscono le due famiglie di curve e da esse si ricavano i valori di S, $\frac{1}{D}$ e R_i.

Strumentazione

Alimentatore: «Leybold»; 52235 B/7319.

Milliamperometro: «Leybold»; 531/86.

Amperometro: «Seb»; 2723; fondo scala 2,5 A; classe 0,5.

Voltmetri: «Norma»; N. 1171924 e 1171925; 1000 Ω/V; classe 0,5.

Reostato: «Off. Galileo»; tipo R8SP; N. 507181; 20 Ω; 5 A.

Valvola: «Telefunken»; EL 11; N. 10097.

a) **Determinazione della corrente di saturazione: $U_g = 0$.**

I_{acc} = 0,4 A		I_{acc} = 0,5 A		I_{acc} = 0,6 A		I_{acc} = 0,7 A	
U_a (volt)	I_a (mA)	U_a (volt)	I_a (mA)	U_a (volt)	I_a (mA)	U_a (volt)	I_a (mA)
0	0,040	0	0,17	0	0,9	0	2,05
50	0,060	50	0,62	50	6,0	50	16,8
100	0,070	100	1,05	100	8,8	100	27
150	0,080	150	1,31	150	12,1	150	40
200	0,095	200	1,55	200	14,0	200	52
250	0,110	250	1,72	250	15,9		

b) **Determinazione della caratteristica statica con I_{acc} = cost.**

U_a = 50 volt		U_a = 100 volt		U_a = 150 volt		U_a = 200 volt	
U_g (volt)	I_a (mA)	U_g (volt)	I_a (mA)	U_g (volt)	I_a (mA)	U_g (volt)	I_a (mA)
0	23	0	38	0	62	0	100
— 5	9	— 5	15,5	— 5	26,5	— 5	44
—11	0	—10	2,5	—10	6,5	—10	12,5
		—13	0	—15,6	0	—15	2,5
						—17	

Bibliografia

OLIVIERI E RAVELLI: *Elettrotecnica - Misure Elettriche*, Vol. III, Cedam, Padova.

MARIO SEDAZZARI: *Misure elettriche industriali*, Vol. I e II, Principato, Milano-Messina.

MAGRINI: *Misure Elettriche*, Signorelli, Milano.

INDICE

CAPITOLO I

Complementi di impianti ..... pag. 7
Impieghi dei quadri di bassa tensione ..... » 7
Cabine di media e alta tensione ..... » 8
Sottostazioni di conversioni ..... » 8
Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica ..... » 9
Linee di trasmissioni aeree ..... » 10
Dati tecnici sui fili di rame per linee elettriche ..... » 10
Caratteristiche delle corde di rame crudo di sezioni normali raccomandate per linee aeree, secondo le norme C.E.I. ..... » 11
Caratteristiche dei conduttori cilindrici di rame crudo di sezione raccomandata per linee aeree, secondo le norme C.E.I. ..... » 11
Notizie generali sui sostegni delle linee elettriche di trasmissione di energia ..... » 13
Caratteristiche dei materiali per condutture elettriche ..... » 13
Distribuzione di energia elettrica mediante cavi ..... » 14
Portata in Ampere dei cavi unipolari con conduttori di rame per c.a. secondo le norme C.E.I. ..... » 14
Luminosità e illuminazione ..... » 15
Fotometria ..... » 15
Coefficiente di visibilità ..... » 16
Brillanza o splendore simbolo B ..... » 17
Lampade ad arco ..... » 17
Lampade ad incandescenza ..... » 18
Lampade a vapore di mercurio e a vapore di sodio ..... » 18
Lampade a gas rarefatti ..... » 19
Lampade fluorescenti ..... » 19
Lampade fluorescenti a catodo caldo ..... » 19
Lampade a catodo freddo ..... » 20
Proprietà dell'occhio umano interessanti la applicazione tecnica della illuminazione ..... » 20
Valori pratici usati nell'illuminamento ..... » 21
Saldatura elettrica ..... » 21
Saldatura a resistenza per punti in c.a. ..... » 22
Saldatura continua a rulli in c.a. ..... » 22
Caldaie elettriche ..... » 23
Impianti di forza motrice ..... » 24
Tabella per impianti di forza motrice ..... » 24
Norme generali per le installazioni delle macchine elettriche ..... » 25
Norme particolari riguardanti le dinamo ..... » 25
Norme particolari riguardanti i trasformatori ..... » 26

CAPITOLO II

Misure Elettriche ..... pag. 27
Unità di misura ..... » 27
Tabella dei simboli ..... » 27
Tabella dei multipli ..... » 30
Apparecchi complementari ..... » 30
Interruttori ..... » 31
Morsetti ..... » 32
Deviatori e invertitori ..... » 32
Resistori campioni fissi ..... » 32
Reostati campioni a cassetto ..... » 33
Reostati a cursore ..... » 35
Errore nella esecuzione delle misure ..... » 36
Strumenti di misura ..... » 37
Principio di funzionamento generale per tutti gli strumenti ..... » 37
Sensibilità e precisione degli strumenti ..... » 38
Classi di precisione ..... » 39
Autoconsumi ..... » 40
Shunt ..... » 40
Resistenze addizionali ..... » 40
Trasformatori di misura ..... » 41
Classe di precisione dei trasformatori di misura ..... » 43

Tipi principali di strumenti ..... » 43
Voltmetri, amperometri, wattmetri e strumenti affini ..... » 43
Frequenziometri ..... » 47
Ohmmetri ..... » 48
Contatori per corrente continua detti contatori elettrodinamici o wattorametri ..... » 48
Contatori a induzione per correnti alternate ..... » 49
Fasometri ..... » 50
Regolatori ad induzione ..... » 51
Accoppiamento in parallelo delle dinamo ..... » 52
Tabella dei simboli ..... » 54
Principali misure inglesi e loro equivalenza nel sistema metrico decimale » 55
Quadrati, cubi, radici quadrate e cubiche ..... » 56
Valori di alcune costanti ..... » 57
Terne pitagoriche ..... » 57
Funzioni trigonometriche di archi speciali ..... » 58

CAPITOLO III

Esercizi di applicazione ..... » 59
Regolazione della tensione con reostato in parallelo ..... » 59
Regolazione della corrente con reostato in serie ..... » 61
Caratteristica tensione-corrente di un bipolo normale ..... » 62
Caratteristica tensione-corrente di un bipolo anomalo ..... » 65
Determinazione del valore di una resistenza col metodo del ponte di Wheatstone ..... » 67
Taratura di un amperometro classe 1 ÷ 1,5 con amperometro campione » 69
Taratura di un voltmetro con voltmetro campione ..... » 70
Taratura di un voltmetro come ohmmetro ..... » 73

Caratteristica esterna di un generatore (batterie di pile) ..... pag. 75
Misura della resistenza interna di un accumulatore ..... » 77
Misura di una capacità col metodo volt-amperometrico ..... » 79
Misura di una induttanza senza ferro col metodo del confronto delle tensioni ..... » 82
Caratteristiche di un galvanometro ..... » 85
Misura della potenza in c.c. metodo volt-amperometrico ..... » 88
Misura di una potenza in c.a. mediante l'uso di un wattmetro e determinazione del cos φ mediante un voltmetro e un amperometro ..... » 89
Taratura di un voltmetro mediante potenziometro (in corrente continua) » 91
Determinazione della cifra di perdita dei lamierini magnetici con l'apparecchio di Epstein ..... » 94
Misura della potenza attiva trifase con il metodo Aron ..... » 98
Taratura di un contatore con carico fittizio a cos φ 1 e 0,5 ..... » 101
Determinazione della caratteristica di magnetizzazione di una dinamo » 105
Taratura di un amperometro mediante potenziometro ..... » 107
Misura di resistenze di valore inferiore ad 1 Ohm col metodo del doppio ponte di Thompson ..... » 109
Misura col metodo Barbagelata di un circuito trifase squilibrato e simmetrico ..... » 111
Prove su un trasformatore monofase: a vuoto, in corto circuito e di rapporto ..... » 114
Prova a vuoto; prova in corto circuito; prova di rapporto di un trasformatore trifase ..... » 118
Prove a vuoto e a rotore bloccato di un motore asincrono trifase con indotto a gabbia e deduzione del diagramma circolare ..... » 124
Taratura di un wattmetro mediante il potenziometro ..... » 131
Rilievo della caratteristica esterna della dinamo con eccitazione in parallelo ..... » 135
Determinazione della permeabilità magnetica dell'aria per mezzo del galvanometro balistico ..... » 137
Separazioni delle perdite nel ferro da quelle meccaniche in un motore a corrente continua ..... » 143
Rilievo delle caratteristiche di un triodo ..... » 145